



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

NACHRICHTEN



50 Jahre

Forschungszentrum Karlsruhe
Bereit für die Zukunft.

Jahrgang 38 • 1-2/2006

Das Forschungszentrum Karlsruhe 2006



Das Forschungszentrum Karlsruhe, eine der größten unabhängigen Forschungseinrichtungen in Europa, feierte im Jahr 2006 seinen 50. Geburtstag.

Im Inhaltsverzeichnis verwendete Abkürzungen:

HVT	Hauptabteilung Versuchstechnik
IBG	Institut für Biologische Grenzflächen
IFP	Institut für Festkörperphysik
IHM	Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik
IK	Institut für Kernphysik
IKET	Institut für Kern- und Energietechnik
IMF	Institut für Materialforschung
IMK	Institut für Meteorologie und Klimaforschung
IMT	Institut für Mikrostrukturtechnik
INE	Institut für Nukleare Entsorgung
INT	Institut für Nanotechnologie
ITC	Institut für Technische Chemie
ITG	Institut für Toxikologie und Genetik
ITP	Institut für Technische Physik
IWR	Institut für Wissenschaftliches Rechnen
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe

Herausgeber:

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640 · 76021 Karlsruhe
Telefon 07247 82-0

Redaktion:

Dr. Joachim Hoffmann

Redaktionsbeirat:

Prof. Dr. K. Beheng, IMK
Prof. Dr. J. Blümer, IK-IEKP
Dr. W. Breitung, IKET
Prof. Dr. E. Dinjus, ITC-CPV
Dr. K. Gompper, INE
Dr. G. Metzger, FTU
Dr. W. Pfleging, IMF-I
Prof. Dr. V. Saile, IMT (Vorsitzender)
Dr. K.-F. Weibezahn, IMB

Layout, Grafik und Satz:

Stolz Grafisches Atelier · Karlsruhe

Druck:

Wilhelm Stober GmbH · Eggenstein

Nachdruck mit Genehmigung des Forschungszentrums Karlsruhe GmbH unter Nennung der Gesellschaft und des Autors gestattet. Beleg erbeten.

Die NACHRICHTEN können kostenlos über die Hauptabteilung Bibliothek und Medien des Forschungszentrums bezogen werden.

Printed in the Federal Republic of Germany

Inhalt / Contents

■ **Einführung und Gesamtschau** **11**
Introduction and Overview

M. Popp, Vorstandsvorsitzender 1991–2006

■ **Forschungsbereich Energie und Atmosphäre** **15**
Research Area Energy and Atmosphere

P. Fritz, Vorstand

■ **Der ITER-Brennstoffkreislauf – Wasserstoffprozessertechnik für die Fusion** **19**
The ITER Fuel Cycle – Hydrogen Process Technology for Nuclear Fusion

Chr. Day, ITP; M. Glugla, HVT; G. Janeschitz, FUSION

For more than a decade the Forschungszentrum Karlsruhe is contributing significantly to the development of the ITER fuel cycle, which will process considerable flowrates of hydrogen isotopes at high flexibility and reliability. The experimental results achieved in tests of prototype components for the tritium plant and the vacuum systems have become a prerequisite basis for a reliable scale-up to ITER. The expertise of the relevant groups in Forschungszentrum Karlsruhe is a key element for the success of ITER.

■ **Weltrekorde in der Gyrotronforschung** **22**
World Records in Gyrotron-Development

G. Dammertz, B. Piosczyk, M. Thumm, IHM

Thermonuclear fusion experiments of the next generation as the stellarator Wendelstein 7-X and ITER require multi-megawatts of millimetre wave power in continuous operation at frequencies of 140 and 170 GHz, respectively. Since 1983/84, the Forschungszentrum Karlsruhe is involved in the development of a suitable millimetre wave technology including high power gyrotrons with an output power of 1 MW for W7-X and 2-MW gyrotrons for ITER. In addition, gyrotrons tunable in discrete frequency steps are being developed for controlled current drive at ASDEX-Upgrade.

■ Weltrekord bei der Hochtemperatursupraleitung

25

World Record for High Temperature Superconductivity

W. H. Fietz, R. Heller, P. Komarek, R. Lietzow, G. R. Zahn, ITP

The Forschungszentrum Karlsruhe and the Centre de Recherches en Physique des Plasmas of the École Polytechnique de Federale de Lausanne have developed a High Temperature Superconductor (HTS) current lead which carries 70,000 A and can be cooled either with Helium or with Liquid Nitrogen. Such current leads are required to feed the electrical current from room temperature to superconducting coils which are operated e.g. in ITER at liquid helium temperature ($-268\text{ °C} = 4.5\text{ K}$). The use of HTS can drastically reduce the cooling power which increases the efficiency of future machines. The new developed HTS current lead carries the highest electrical current worldwide. In the meantime it is proposed to use these current leads in the fusion reactor ITER which is presently under construction in Cadarache, France.

■ Sicherheitsforschung für Kernreaktoren

28

Safety Research for Nuclear Reactors

W. Scholtyssek, W. Tromm, Programm Nukleare Sicherheitsforschung

German nuclear power plants are run safely according to the state of the art. For the state's providence, constant in-depth reactor safety R&D is required. The Forschungszentrum Karlsruhe theoretically and experimentally studies design and beyond-design accidents of light water reactors and their radiological consequences. The experiments and computer programs developed significantly enhance the knowledge about the course of accidents and interference options for their mitigation. This work decisively contributes to the further safe operation of existing reactors also on the international level.

■ Verglasungseinrichtung Karlsruhe (VEK): Verglasung hochradioaktiver Abfalllösungen

33

Karlsruhe Vitrification Plant VEK: Vitrification of Highly Radioactive Waste Solutions

J. Fleisch, WAK; G. Roth, S. Weisenburger, INE

The VEK project has been established to vitrify the highly radioactive waste solution (HLLW) currently stored on the site of the former WAK pilot reprocessing plant. Construction of the VEK plant took place from 2000 to 2005 using the vitrification technology developed by Forschungszentrum Karlsruhe. Based on the recently granted first operational license a cold test operation will be carried out in autumn of 2006 by vitrification of 15 m^3 of simulated HLLW and production of about 27 glass canisters. The cold test serves for final check of the integral plant functioning prior to start of radioactive operation. During hot operation, requiring the second operational license, totally $7.7 \times 10^{17}\text{ Bq}$ of β/γ -activity and $7.2 \times 10^{15}\text{ Bq}$ of α -activity will be immobilized in borosilicate glass.

■ Partitioning und Transmutation

37

Partitioning and Transmutation

C. Fazio, J. U. Knebel, W. Tromm, Programm Nukleare Sicherheitsforschung; A. Geist, K. Gompper, INE

Worldwide, about 10,000 t/a of spent nuclear fuel arise for disposal. Due to the long half-lives of some radionuclides, long-term isolation of radioactivity must be ensured. Therefore, alternatives to final disposal are studied. The international focus is on the partitioning of long-lived radionuclides from the spent fuel and their transmutation into stable or short-lived isotopes by neutron reactions. The Forschungszentrum Karlsruhe studies the partitioning of Am and Cm by liquid-liquid extraction and coordinates the European Research Program for the Transmutation (EUROTRANS) of high-level waste in accelerator-driven systems.

■ Sicherheitsforschung zur Endlagerung

41

Safety Research for Nuclear Waste Disposal

K. Gompper, R. Klenze, H. Geckeis, B. Kienzler, T. Fanghänel, INE

Safety research for nuclear waste disposal carried out at the Institut für Nukleare Entsorgung (INE) contributes to a geochemical based long term safety assessment for repositories with radioactive wastes. R&D focuses on the disposal of high level waste and the aquatic chemistry of actinides and long-lived fission products. Fundamental studies of radionuclide reactions on molecular scale are closely combined with applied investigations on real systems e. g. in underground laboratories.

■ Neue Reaktorsysteme innerhalb der Generation IV Initiative

45

Generation IV: New Reactor Systems

J. Starflinger, T. Schulenberg, IKET; J. Hofmeister, RWE Power AG;
W. Tromm, Programm Nukleare Sicherheitsforschung

Generation IV, an initiative for international cooperation in nuclear technology, was launched by 10 states in 2000 and joined by Euratom in July 2003. Its aim is to assess nuclear energy systems complying with future safety, disposal, proliferation, and public acceptance requirements. The Forschungszentrum Karlsruhe focuses on design, thermohydraulics, and neutron kinetics. Work is mainly devoted to the high-performance light water reactor (HPLWR) with supercritical steam conditions. Thus, competence can be maintained, as the HPLWR issues qualify for later work in nuclear industry.

■ **Forschung für Wasserstoffsicherheit**

49

Research for Hydrogen Safety

W. Breitung, IKET

This article describes research performed at Forschungszentrum Karlsruhe in the field of hydrogen safety. The investigations address hydrogen related phenomena in reactor safety, fusion, and hydrogen as future energy carrier. An overview is presented with respect to objectives and results in the areas of hydrogen distribution simulation, hydrogen combustion simulation and related verification experiments.

■ **Synthesekraftstoffe und Wasserstoff aus Biomasse**

53

Synthetic Fuels and Hydrogen Production from Biomass

N. Dahmen, E. Dinjus, ITC

Acting as the only renewable source of carbon, biomass on a long term has to be utilized for production of fuels and chemicals. Thermochemical processes are capable to convert biomass in large scale applications. Presently, two processes are developed at the Forschungszentrum Karlsruhe. The first converting dry biomass into synthetic fuels via production of synthesis gas by a process consisting of fast pyrolysis, entrained flow gasification, and fuel synthesis. In the other process, hydrogen is generated by hydrothermal or supercritical water gasification of wet biomass.

■ **Supraleitende Strombegrenzer und Supraleiterentwicklung für die Energietechnik**

56

Superconducting Current Limiter and Superconductor Development for the Energy Technique

P. Komarek, W. Goldacker, M. Noe, ITP

At very low temperatures superconductivity allows transport of electric power with nearly no losses. For the ceramic High Temperature Superconductors (HTS), discovered 1986, efficient and inexpensive cooling with liquid Nitrogen is sufficient, which is a crucial factor for an economic application in energy technology. The development of optimized HTS materials and superconducting devices for energy applications is a central research topic in the Institute for Technical Physics (ITP), in particular new devices such as superconducting energy storage and the superconducting fault current limiter (FCL).

■ **Energie aus Abfall** 59
Energy from Waste

H. Seifert, ITC

Energy recovery from solid waste by incineration can replace a substantial part of fossil fuel. Since a great share of the energy inventory in waste is of biogenic origin, the resulting reduced CO₂ emissions contribute to climate protection. Besides direct waste-to-energy plants combination processes like the Karlsruher UPSWING process and co-combustion e. g. in power plants become more important. For that further investigations on the combustion behaviour of solid waste and on the abatement of boiler corrosion are performed.

■ **MIPAS entdeckt Salpetersäurewolken über der Antarktis** 62
MIPAS Discovers Nitric Acid Trihydrate Clouds over Antarctica

M. Höpfner, H. Fischer, IMK

Polar stratospheric clouds are key components in polar ozone depletion. The IMK instrument MIPAS detected a belt of polar stratospheric clouds over Antarctica consisting of nitric acid trihydrate which is explained by heterogeneous nucleation on ice caused by mountain waves over the Antarctic Peninsula.

■ **Auswirkungen der Klimaänderung auf den biosphärischen N-Spuren-gasaustausch** 65
Impact of Climate Change on the Biospheric Exchange of N-trace Gases

N. Brüggemann, K. Butterbach-Bahl, R. Forkel, R. Knoche, H. Papen, W. Seiler, C. Werner, IMK

A very likely climate change scenario for the near future (2031–2039) for Southern Germany in combination with process-oriented modelling revealed an increase of NO and N₂O emissions from forest (NO: +12.2 %, N₂O: +4.5 %) and agricultural soils (NO: +10.1 %, N₂O: +18.3%) as compared to 1991–1999.

■ **Kristallklar und federleicht: Eiswolken im Labor** 68
Crystal Clear and Feathery: Ice Clouds in the Laboratory

M. Schnaiter, S. Benz, O. Möhler, R. Schön, IMK

Cirrus clouds are high, cold clouds composed entirely of ice crystals. By scattering solar and absorbing terrestrial radiation they have a direct impact on climate. Laboratory investigations on the microphysics of ice crystal formation help to understand the climate role of cirrus.

■ Neue Lidar- und Radartechnologien in der Atmosphärenforschung

71

New Lidar and Radar Technologies in Atmosphere Research

J. Handwerker, A. Wieser, K. D. Beheng, Ch. Kottmeier, IMK

Conventional in-situ measurements of time-dependent, three-dimensional, and very complex flows within the troposphere suffer from an insufficient temporal and spatial coverage. To overcome these deficiencies sophisticated active remote sensing instruments are now at hand. Here, we present two new instruments that expand the observation methods available at the Forschungszentrum: a Doppler-Lidar „WindTracer“ and a scanning cloud radar „MIRA36-S“. These devices extend existing observation techniques considerably, allowing now the investigation of wind fields in and around convective clouds in great detail, a prerequisite for improving the representation of convective processes in weather and climate models.

■ Einführung Forschungsbereich Schlüsseltechnologien

75

Introduction Research Area Key Technologies

M. Popp, Vorstandsvorsitzender 1991–2006

■ Elektronischer Transport durch Nanostrukturen

77

Electronic Transport through Nanostructures

H. v. Löhneysen, IFP und Universität Karlsruhe; D. Beckmann, INT;
M. M. Kappes, R. Krupke, INT und Universität Karlsruhe; M. Mayor, INT und Universität Basel;
H. B. Weber, INT und Universität Erlangen-Nürnberg

The electronic conduction through nanostructures offers a wealth of new phenomena not known from macroscopic samples. A few examples of recent research at INT are given: electron transport through single molecules, separation of metallic and semiconducting carbon nanotubes which is a prerequisite for a possible future molecular electronics, and spatially separated but quantum-mechanically coherent electron pairs in superconductor-ferromagnet nanocontacts.

■ Photonische Metamaterialien

81

Photonic Metamaterials

S. Linden, M. Wegener, INT

Metamaterials are man-made materials that can exhibit magnetism at very high frequencies, a pre-requisite for a negative index of refraction. In the last few years, using nanotechnology, these concepts have been brought from the microwave regime towards optical frequencies.

■ LIGA: Von der Trenndüse zu Zahnrädern für Luxusuhren

84

LIGA: From Nozzles for Uranium Enrichment to Gearwheels for Swiss Luxury Watches

W. Bacher, V. Saile, IMT

The LIGA technology has been invented in the 1980s within a technology development project for Separation Nozzles for Uranium enrichment. IMT, founded in 1989, is devoted to microstructure technologies, with special emphasis on the LIGA process using the synchrotron radiation source ANKA. For fabricating microoptical devices the LIGA technology offers significant advantages. Recently, planary refractive X-ray lenses have been developed and manufactured from SU-8 as well as Nickel. Commercialization of the LIGA technology could be demonstrated by manufacturing thousands of extremely precise gearwheels for the Swiss watch industry.

■ Dünnschichtdesign im Nanomaßstab

87

Nano-scaled Coating Design

S. Ulrich, M. Stüber, H. Leiste, IMF

Recent surface coating technologies often involve nanoscale design to meet ever-increasing application demands for the multifunctionality of coatings. Various nanocomposites and nanolaminates tailored for specific application fields are thus devised under novel concepts and produced using physical vapor deposition (PVD) and plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) techniques. Besides routine process optimization, strong interactions among theoretical modeling, smart exploiting of nanosize effects as well as adapted interface design are shown as the key to a successful development of multifunctional coatings.

■ Tissue Engineering

91

Tissue Engineering

K.-F. Weibezahn, IBG

Tissue Engineering is a rapidly developing field which depends on highly interdisciplinary cooperation. The division "Cells and Interfaces" of the IBG has great experience in 3D-Cell culture and develops a platform for the organotypic cultivation of adult stem cells for controlled expansion, differentiation and transplantation. The modification and characterisation of all kinds of biological interfaces which also comprise polymers used for the manufacturing process are an important prerequisite.

■ **Der Zebraärlbling als Modell der Entwicklung und Regeneration**
The Zebrafish as Model to Study Development and Regeneration

93

U. Strähle, S. Rastegar, C. Etard, S. Weg-Remers, F. Müller, ITG

The zebrafish is used as a model organism for its experimental virtues to address the mechanisms of development. In particular, it is very well suited to carry out genetic studies, which have proven to be extremely powerful to unravel complex biological processes. Several thousand mutants were isolated in genetic screens in recent years. These mutants serve as animal models to study development and heritable diseases. In addition, the zebrafish embryo is increasingly used for drug-screening and in toxicological studies. Adult zebrafish like other lower vertebrates have the remarkable ability to heal injured organs. In recent years, researchers have also turned to the investigations of tissue regeneration in the zebrafish.

■ **50 Jahre Grundlagenforschung zur Struktur der Materie am**
Forschungszentrum Karlsruhe

96

50 Years of Fundamental Research in the Research Area "Structure of Matter" at
Forschungszentrum Karlsruhe

R. Maschuw, Vorstand

■ **Kosmische Strahlung – ein neues Fenster zum Universum**
Cosmic Particles – A New Window to the Universe

100

J. Blümer, IK und Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe

Earth is constantly bombarded by high-energy particles from the cosmos. The photons, nuclei and neutrinos carry information about astrophysical processes in stars, about the structure of galaxies, and they allow deep views into otherwise inaccessible regions, e.g. into the interior of the sun or the proximity of supermassive black holes. Forschungszentrum Karlsruhe is engaged in the KASCADE-Grande and Pierre Auger Projects at the leading edge of astroparticle physics.

■ **Neutrinos auf der Waage von KATRIN**
Neutrinos – on the Scales of KATRIN

103

G. Drexlin, IK und Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe

One of most important unresolved questions of the structure of matter and the evolution of the universe is linked to the absolute mass scale of neutrinos. The international Karlsruhe Tritium Neutrino (KATRIN) Experiment, which is currently being built up at Tritium Laboratory Karlsruhe (TLK), will investigate this fundamental parameter with unprecedented precision. The various technological challenges require the close cooperation of four institutes of Forschungszentrum Karlsruhe. The KATRIN measurements will start in 2009 after system integration of all major components and continue for several years to reach the design sensitivity of 0.2 eV for the neutrino mass.

■ **Kondensierte Materie: Elektronen mit starken Korrelationen**

106

Condensed Matter: Electrons with Strong Correlations

H. v. Löhneysen, IFP und Universität Karlsruhe; K.-P. Bohnen, IFP

The interaction between electrons in condensed matter is responsible for a variety of collective states, e.g. superconductivity or magnetic order. The interplay of strongly correlated electrons can be investigated by neutron and electron spectroscopies, together with high-resolution thermodynamic and transport measurements. Recent examples of the work of IFP include the unambiguous observation of dynamic stripe order in cuprate high-temperature superconductors, strong interband electron-phonon coupling in the two-band superconductor MgB_2 , and the discovery of a new type of magnetic order by elastic neutron scattering in the weak ferromagnet MnSi in the vicinity of a quantum phase transition.

■ **GridKa – Grid Computing Centre Karlsruhe**

110

GridKa – The Grid Computing Centre Karlsruhe

K.-P. Mickel, IWR

Presently at CERN near Geneva the Large Hadron Collider LHC is built, so far the strongest and largest particle accelerator on Earth. From 2007 LHC will produce the hugest amount of experimental data ever seen in the world. For evaluation of these data a global Computing Grid infrastructure is in being, which consists among others of twelve very large computer centres in Northern America, Europe and Far East. GridKa, the Grid Computing Centre Karlsruhe, is one of these and serves mainly the physicists in Middle Europe.

Einführung und Gesamtschau

M. Popp, Vorstandsvorsitzender 1991–2006

Vom Kernforschungszentrum ...

50 Jahre Forschungszentrum Karlsruhe bedeuten in erster Linie Wandel, Veränderungen und Anpassung an wechselnde Anforderungen und Aufgaben. Was vor 50 Jahren im Landkreis Karlsruhe gegründet wurde, sollte ursprünglich eine von Bund und der Wirtschaft gleichmäßig getragene Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Kernreaktoren sein. Doch bald schon teilten sich die Wege. Die Forschung wurde zur staatlichen Aufgabe, die Entwicklung, der Bau und der Betrieb von Kernkraftwerken zur industriellen. So wurde aus der Reaktorstation ein öffentliches Forschungszentrum, das sehr erfolgreich und international angesehen in der Kerntechnik arbeitete, aber schon bald auch weitere Themen aufnahm.

... zur multidisziplinären Forschungseinrichtung

Von Anfang an wurden auch Themen der reinen Grundlagenforschung etwa in der Kern- und Elementarteilchenphysik bearbeitet. Seit Ende der 60er Jahre kam das Thema Umweltforschung hinzu, weil die Kerntechniker im Umgang mit computergestützten Ausbreitungsmodellen für Schadstoffe einen großen Know-how-Vorsprung hatten, der nun auch auf die beginnende Umweltforschung angewandt werden konnte. In den 80er Jahren wurde mehr als die Hälfte des Programms des damaligen Kernforschungszentrums umgestellt, nicht etwa weil es an Aufgaben im nuklearen Bereich mangelte, sondern weil viele Aufgaben an die Industrie übergegangen



Abb. 1: Die Gründungsaufgabe der Kernreaktorbau- und Betriebsgesellschaft, der ersten Vorläuferinstitution des Forschungszentrums Karlsruhe, waren Entwicklung, Bau und Betrieb des Forschungsreaktors 2.



Abb. 2: Das Forschungszentrum Karlsruhe ist mit rund 3700 Mitarbeitern eine der größten staatlich geförderten Forschungseinrichtungen in Europa. Es ist heute auf den Gebieten Energie und Atmosphäre, Schlüsseltechnologien wie Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie und Struktur der Materie tätig.

waren. In dieser Zeit begannen Themen wie die Fusionsreakortechologie, die Umwelttechnik und die Mikrosystemtechnik. Ende der 90er Jahre griff das Forschungszentrum das Thema Nanotechnologie energisch auf, in dem es jetzt zusammen mit der Universität Karlsruhe den Spitzenplatz in Deutschland einnimmt. Und der Wandel wird weitergehen: Neue Themen wie das wissenschaftliche Rechnen insbesondere mit weltweit vernetzten Computern (Grid Computing) oder die Nanobiologie stellen das Zentrum vor neue Herausforderungen.

Eine von den Gesellschaftern Bund und Land eingesetzte hochrangige internationale Perspektivkommission hat zu Beginn des Jubiläumsjahrs den eingeschlagenen Weg in die Zukunft des Forschungszentrums eindrucksvoll bestätigt. Das größte Thema des Forschungszentrums wird deshalb auch in der Zukunft die Energieforschung sein, die zusammen mit dem Beitrag in der Atmosphären- und Klimaforschung die Hälfte der Kapazität des Forschungszentrums auslasten wird. Ein Drittel der Kapazität wird den Nano-

und Mikrotechnologien gewidmet sein und ein Sechstel den Grundlagenarbeiten zum besseren Verständnis der Materie im Kosmos. Dieses Heft spiegelt diese künftige Ausrichtung des Forschungszentrums wider und belegt in vielfacher Weise die Aktualität dieser zukunftsweisenden Themen.

Ein neues Modell: Das Karlsruher Institut für Technologie

In Übereinstimmung mit der Einschätzung der Perspektivkommission wird das Forschungszentrum weitere Steigerungen der Qualität seiner Arbeit nur noch durch ein noch engeres Zusammengehen mit den Universitäten – und insbesondere mit der Universität Karlsruhe – erreichen. Durch die Gründung des Karlsruhe Institute of Technology wollen Universität Karlsruhe und Forschungszentrum die einzigartigen Voraussetzungen am Standort Karlsruhe für diesen Sprung in eine noch höhere Exzellenz nutzen und damit internationale Wettbewerbsfähigkeit auf höchstem Niveau erreichen. Universität und Forschungszentrum sind mit je knapp 4.000 Mitarbeitern in etwa gleich groß, haben ein nahezu identisches Fächerspektrum, sind nur 10 km voneinander entfernt und werden zusammengerechnet von Bund und Land zu je etwa 50 % finanziert. Aufbauend auf einer seit Jahrzehnten gewachsenen Zusammenarbeit beispielsweise im erfolgreichen Betrieb von Gemeinschaftsinstituten, wollen beide Einrichtungen nun die Synergien systematisch weiter erschließen und zu einer gemeinsamen Organisation zusammenwachsen. Diese Or-

ganisation wird dann in die Größenordnung großer internationaler Forschungsuniversitäten hineinragen und damit eine wesentlich größere kritische Masse für die Bearbeitung der Fragen bieten, denen sich das Forschungszentrum im Rahmen der Helmholtz-Gemeinschaft auch in Zukunft stellen wird: Fragen von großer gesellschaftlicher Bedeutung und Relevanz für die Zukunftssicherung unseres Gemeinwesens.

Einbettung in die Wissenschaftslandschaft

Der Wandel des Forschungszentrums Karlsruhe betrifft aber noch viele andere Aspekte und nicht nur die programmatischen Inhalte. Das Kernforschungszentrum war in den meisten Themen ein Monopolist, der international mit vielen Partnern eng vernetzt war aber innerhalb Deutschlands in seinen Hauptgebieten kaum Konkurrenz zu fürchten hatte. Das heutige Forschungszentrum ist erfolgreicher Wettbewerber insbesondere im Rahmen der programmorientierten Förderung der Helmholtz-Gemeinschaft aber auch im allgemeinen wissenschaftlichen Wettbewerb, bei dem sich die Stellung des Zentrums durch die exzellenten Ergebnisse aller Evaluierungen in seinen Programmfeldern eindeutig belegen lässt. Das Kernforschungszentrum war geprägt durch eine sehr starke technische Infrastruktur zum Bau und Betrieb von nuklearen Anlagen. Heute ist das Forschungszentrum Karlsruhe das Zentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft mit den geringsten Umlagen für Infrastruktur und Verwaltung. Es hat durch diese Verschlankung sehr an wissenschaft-



Abb. 3: Die Zukunft des Forschungszentrums Karlsruhe liegt im Karlsruhe Institut für Technologie (K.I.T.), in dem das Forschungszentrum gemeinsam mit der Universität Karlsruhe in die Spitzenliga der internationalen Forschungseinrichtungen vorstoßen will.

licher Dynamik gewonnen. So ist zum Beispiel seit 1990 die Zahl der Beschäftigten deutlich gesunken, die Zahl der Wissenschaftler aber ebenso deutlich angestiegen. Das Kernforschungszentrum verstand sich in erster Linie als Forschungseinrichtung des Bundes, in dem nur einige Institutsleiter personell mit der Universität Karlsruhe und anderen Universitäten verbunden waren. Das heutige Forschungszentrum ist intensiver Kooperationspartner der Universitäten, insbesondere natürlich mit der größten Intensität und Breite mit der Universität Karlsruhe, aber auch mit den Universitäten Heidelberg, Freiburg, Stuttgart, Straßburg, Darmstadt, Basel und vielen anderen. Es profitiert davon, dass es in keinem anderen Raum in Deutschland eine solche Häufung von exzellenten Universitäten, darunter auch viele mit technischer Ausrichtung gibt. Dieser Weg eines immer engeren Zusammengehens mit Universitäten wird auch die Zukunft des Forschungszentrums entscheidend prägen.

Neue Technologien für Wissenschaft und Wirtschaft

Ein wichtiger Aspekt der Arbeit des Forschungszentrums gilt nach wie vor der Zusammenarbeit mit der Industrie und der wirtschaftlichen Bewertung seiner Erkenntnisse. Neben dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt ist das Forschungszentrum Karlsruhe sicherlich das am stärksten anwendungsorientierte Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft. Viele wichtige Entwicklungen beruhen zu einem hohen Teil auf Arbeiten im For-

schungszentrum, so zum Beispiel die hohen Sicherheitsreserven des europäischen Druckwasserreaktors, der jetzt in Finnland und Frankreich realisiert wird; wichtige Auslegungsdaten für das in weltweiter Kooperation betriebene Fusionsexperiment ITER, das in Cadarache in Frankreich gebaut wird; die Realisierung einer äußerst schadstoffarmen Müllverbrennung durch ein besseres Verständnis der Verbrennungsprozesse, Erkenntnisse für Belastungen der Atmosphäre und ihre Ursachen; der beginnende Marktdurchbruch von Produkten der Mikrosystemtechnik wie zum Beispiel einem Spektrometer mit vielfachen medizinischen Anwendungen oder Mikrogetriebe mit vielfachen Anwendungen in der Uhrenindustrie und in der Elektronikindustrie. Die

Wege dieser Kooperationen zwischen Forschungszentrum und Industrie sind vielfältig, sie reichen von Auftragsforschung und Kooperationsverträgen über Lizenzverträge und Ausgründungen bis hin zu dem Know-how-Transfer über Köpfe durch den Wechsel von Mitarbeitern in die Wirtschaft. Nimmt man allein den einen Weg der Lizenzverträge, so kann man aus der Gesamtsumme der Lizenzeinnahmen und ihrem in der Regel rund 1%igen Anteil am industriellen Umsatz bereits hochrechnen, dass der gesamte staatliche Aufwand für die Finanzierung des Forschungszentrums einen mindestens gleichgroßen Umsatz in der Wirtschaft zur Folge gehabt hat. Die übrigen Transferwege sind aber noch sehr viel bedeutender.



Abb. 4: Der Transfer von neuen Technologien in die Wirtschaft ist eine der wichtigsten Aufgaben des Forschungszentrums. Eines der erfolgreichsten Technologietransfer-Projekte des Forschungszentrums ist der so genannte Pipeline-Molch, eine gemeinsame Entwicklung mit der Firma Pipetronix (heute GE Energy), zur Inspektion von Erdölpipelines.

Gesellschaftliche Verantwortung

Das Forschungszentrum ist sich seiner Verantwortung für den Technologietransfer bewusst, weil es nur durch Innovationen und modernste Technologien möglich ist, den hohen Lebensstandard in Deutschland zu sichern. In dieser Zukunftsorientierung wird sich das Forschungszentrum aber nicht nur auf technische Beiträge beschränken. Es fühlt sich als großes Na-

tionallaboratorium in besonderer Weise dazu aufgerufen, auch repräsentativ für die entwickelten Technologien zu denken und zu handeln. So spielt das Thema Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse im Forschungszentrum eine besonders wichtige Rolle, die sich auch in den Aufträgen des Deutschen Bundestags und des Europäischen Parlaments an das Forschungszentrum spiegeln, die jeweiligen Einrichtungen zur Beratung des Parlaments zu

betreiben. Wir werden auch in Zukunft Chancen und Risiken neuer Technologien gewissenhaft betrachten und bewerten und den Prozess der Einführung neuer Technologien mit seinen Rückwirkungen auf Gesellschaft und Politik wissenschaftlich begleiten.

Forschungsbereich Energie und Atmosphäre

P. Fritz, Vorstand

Der Forschungsbereich „Energie und Atmosphäre“ repräsentiert prozentual das größte Standbein in der langfristigen Strategie des Forschungszentrums.

Motivation

Das Forschungszentrum stellt sich damit der Herausforderung Antworten auf eine zentrale Frage der Menschheit, nämlich der sicheren, zuverlässigen und bezahlbaren Energiebereitstellung mit geringstmöglicher Schädigung der Atmosphäre zu erarbeiten und setzt dabei auf einen breiten Energiemix. Deshalb wird der gesamte Bereich der Primär- und Sekundärenergieträger mit einem deutlichen Schwerpunkt im Bereich grundlastfähiger Stromerzeugungstechnologien sowohl im Gesamtzusammenspiel als auch einzeln untersucht mit dem Ziel ein Maximum an Ressourcenschonung, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit zu ermöglichen. Alle Szenarien und Erwartungen zur Zukunft der Energieversorgung gehen davon aus, dass der Bedarf an Energie gewaltig steigen wird – nicht so sehr in den traditionellen Industrieländern, sondern vor allem in Ländern wie China, Indien und anderen sich rapide entwickelnden Volkswirtschaften. Dabei wird neben der absoluten Reichweite der Primärenergieträger zunehmend die Unabhängigkeit von politisch wenig stabilen Lieferregionen eine Rolle spielen.

Nukleare Sicherheitsforschung

Ein Element des breiten Energiemix stellt weltweit auch zukünftig die Kerntechnik dar. Im Programm Nu-



Abb. 1: Wasserstofftechnikum: Das Wasserstofftechnikum des Forschungszentrums wurde in enger Zusammenarbeit mit der Industrie aufgebaut. Hier werden Experimente zur Ausbreitung und Verbrennung von Wasserstoff durchgeführt, die für die Nukleare Sicherheitsforschung, aber auch für die konventionelle Nutzung von Wasserstoff als Energieträger benötigt werden.

kleare Sicherheitsforschung hat das Forschungszentrum die führende Stellung in der Helmholtz-Gemeinschaft inne. Das Programm beinhaltet wissenschaftlich-technische Aspekte der Sicherheit von Kernreaktoren und der Sicherheit der Nuklearen Entsorgung. Unter den gegenwärtigen politischen Bedingungen werden Kernkraftwerke in Deutschland noch für mindestens 20 Jahre betrieben; der für Industrie, Betreiber, vor allem aber auch für Gutachter und Genehmigungsbehörden erforderliche Sachverstand wird gegenwärtig durch das normale Ausbildungssystem an Hochschulen und Fachhochschulen nicht mehr ausreichend gedeckt. Das Forschungszentrum Karlsruhe sieht es deswegen, gerade auch auf der Grundlage seiner Geschichte, als seine

Verantwortung an, hier die erforderliche Kompetenz weiterzuentwickeln. Gleichzeitig verfolgt das Forschungszentrum mit seinen Forschungszielen aber auch neue wissenschaftliche Aufgaben wie beispielsweise im Bereich der Entsorgung, durch Partitioning und Transmutation das Gefährdungspotenzial der radioaktiven Abfälle aus der Kernenergienutzung von geologisch auf historisch kontrollierbare Zeiträume zu verringern und so dauerhaft nur noch Abfälle ablagern zu müssen, die den in der Natur vorkommenden, radioaktiven Stoffen entsprechen. Das Forschungszentrum ist durch die Breite der Arbeiten damit auch auf eine mögliche Renaissance von kerntechnischen Forschungsthemen, wie sie sich weltweit abzeichnet, gerüstet.

Kernfusion

Die Entwicklung der Kernfusion als Energiequelle auf der Erde ist eines der ehrgeizigsten und langfristigen Forschungsvorhaben, die gegenwärtig verfolgt werden. Das Forschungszentrum hat sich seit Mitte der 80er Jahre in diesem Gebiet vor allen Dingen auf Technologien für Fusionskraftwerke konzentriert und damit eine Aufgabe übernommen, die mit dem Fort-

schritt der weiteren Entwicklung immer mehr an Bedeutung gewinnen wird. Schon heute hat das Forschungszentrum im europäischen Programm und im weltweiten Vergleich eine Spitzenstellung bei Aufgaben wie Tritiumtechnologie, supraleitenden Magneten, Hochfrequenzheizung und Fusionsmaterialien inne. Das Aufgabenspektrum des europäischen Fusionsprogramms und damit das des Programms Kernfusion wurde

und wird durch die Entscheidung, dass die nächste Stufe eines Fusionsreaktors, der ITER in Cadarache, Frankreich gebaut wird, nachhaltig beeinflusst. Aufgrund seiner Fachkompetenz, jahrelanger vorbereitender Arbeiten und seiner großtechnischen Testeinrichtungen ist das Forschungszentrum nun in besonderer Weise für den deutschen Beitrag bei der Realisierung von ITER prädestiniert.

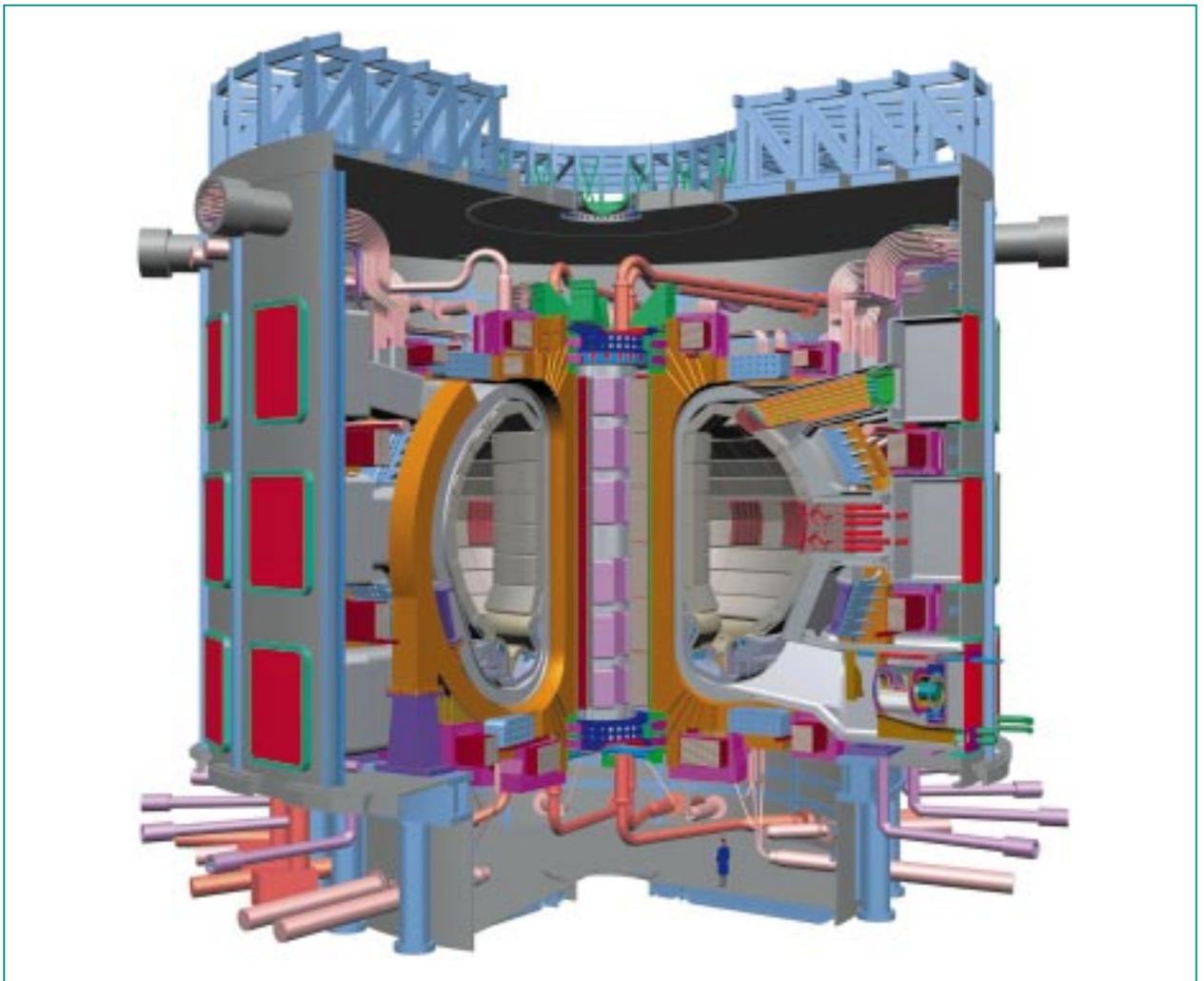


Abb. 2: ITER: Das Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt Technologien für ITER, eine Anlage für die Kernfusion, die in internationaler Kollaboration in Cadarache, Südfrankreich, aufgebaut wird. Dazu gehören supraleitende Spulen, Gyrotrons für die Plasmaheizung sowie die Handhabungstechnik für den Brennstoff Tritium.

Rationelle Energieumwandlung

Im Programm Rationelle Energieumwandlung sind die Arbeiten des Forschungszentrums zur nicht-nuklearen Energietechnik – vom Einsatz der Supraleitung bis zur Untersuchung von Verbrennungsvorgängen in Kraftwerken – zusammengefasst. Das Programm wird zukünftig durch die Überleitung von bisherigen umwelttech-

nischen Vorhaben zu stärker energietechnischen Anwendungen (wie z. B. die energetische Verwertung von Reststoffen) ergänzt. Als „spin-off“ aus der Fusionsforschung werden supraleitende Materialien und Netzkomponenten zum möglichst verlustfreien Stromtransport weiterentwickelt. Ziele der Entwicklungen sind hierbei die Erarbeitung systemangepasster Leitertechnologien und Funktionsmodellen zur Demonstration

der Zuverlässigkeit solcher Komponenten in Zusammenarbeit mit Industriepartnern. Im Programmbereich Kraftwerkstechnik werden Technologien bearbeitet, die zu einer effizienteren und schadstoffärmeren Energieumwandlung in Kraftwerken führen werden. Der Einsatz von Abfällen oder Biomasse dient dabei sowohl der Ressourcenschonung wie der CO₂-Vermeidung und trägt so als ein Baustein zur Lösung bestehender Umweltprobleme bei; ein unerlässlicher Schritt, wenn die weltweit gesetzten Klimaschutzziele erreicht werden sollen. Hierfür werden im Forschungszentrum kraftwerkstaugliche Systeme entwickelt, die eine Mitverbrennung alternativer Brennstoffe (Pyrolysegase, -öle, -kokse, Slurries, flüssige heizwertreiche Abfälle und Ersatzbrennstoffe oder feste Biomassen) ermöglichen. Gleichzeitig wird in dem Leuchtturmprojekt „Erstellung einer bioliq[®]-Pilotanlage“ mit einem Durchsatz von 500 kg/h Stroh gezeigt, dass die Verwertung von Biomasse eine sinnvolle Möglichkeit zur Herstellung hochwertiger Treibstoffe darstellt, die die Erdölabhängigkeit verringern können.

Auswirkungen auf die Umwelt

Das Forschungszentrum ist davon überzeugt, dass in den nächsten Jahren dem Thema Energieforschung wieder der angemessene Stellenwert beigemessen werden wird. Dies gilt umso mehr als wir unsere Arbeiten in der Klima- und Atmosphärenforschung mit den Energieforschungsarbeiten gekoppelt haben. Die komplexen chemischen und dynamischen Vorgänge in der Atmosphäre müssen

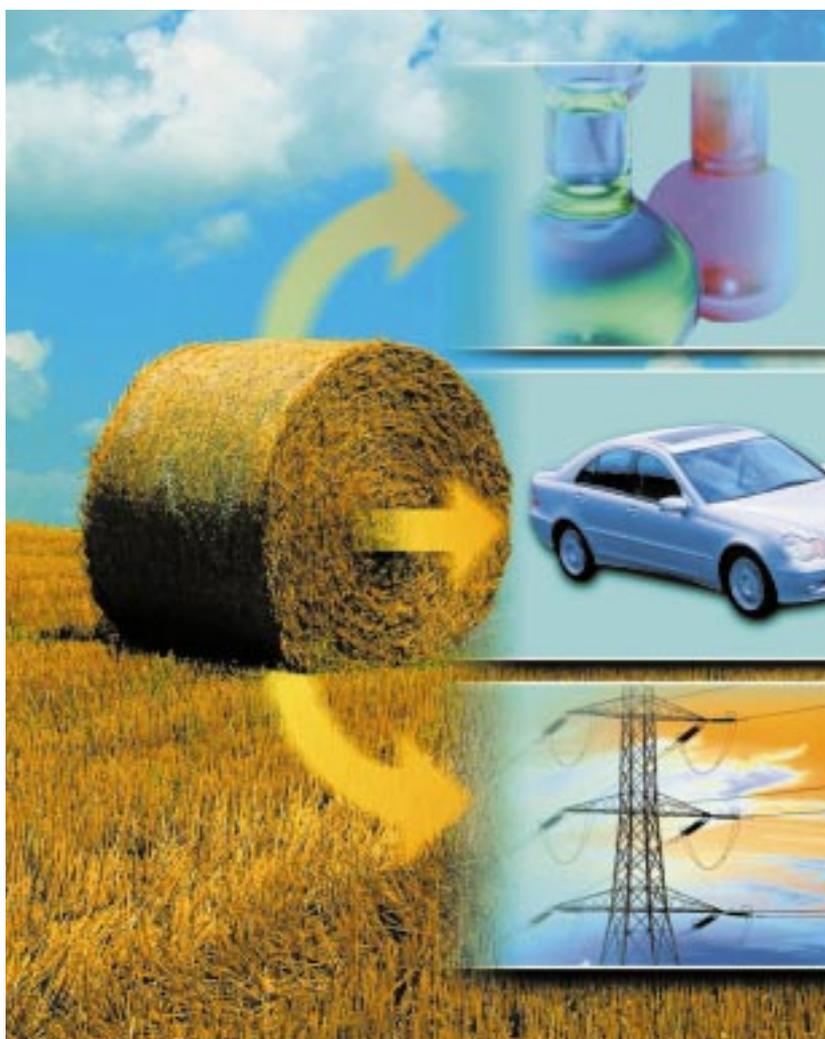


Abb. 3: Stroh: Das im Forschungszentrum entwickelte bioliq[®]-Verfahren ermöglicht die wirtschaftliche Herstellung von Hochleistungskraftstoffen oder auch Grundstoffen für die chemische Industrie aus Stroh und anderen biologischen Reststoffen

immer besser verstanden werden, um daraus eine zuverlässigere Bewertung der anthropogenen Einflüsse zu ermöglichen und steuernd in technische Prozesse eingreifen zu können.

Das Institut für Meteorologie und Klimaforschung, das in seiner Größe in Deutschland einmalig ist, wurde als Gemeinschaftsinstitut mit der Universität Karlsruhe gegründet und durch weitere Professuren mit der Universität Heidelberg und der Technischen Universität München ergänzt. Seit 2002 verfügt es mit der Niederlassung in Garmisch-Partenkirchen mit Messeinrichtungen auf der

Zugspitze über zusätzliche einzigartige Arbeitsmöglichkeiten. Im Fokus der Arbeiten stehen hierbei die Untersuchungen des Verhaltens der Stratosphäre, der Troposphäre und der Biosphäre sowie ihrer komplexen Wechselwirkungen im Globalen Wandel. Schwerpunkte sind dabei die Erfassung des hydrologischen Kreislaufs sowie der biogeochemischen Kreisläufe wichtiger umweltrelevanter Spurengase und Aerosole.

Die Koppelung von breit angelegten Energieforschungsprogrammen mit einer umfassenden Atmosphären- und Klimaforschung im Forschungszentrum Karlsruhe

ist ein Alleinstellungsmerkmal, das unter Einschluss der Technikfolgen- und Systemanalyse, das Ziel, Europas führendes Energieforschungszentrum zu werden, unterstreicht.

Der ITER-Brennstoffkreislauf – Wasserstoffprozesstechnik für die Fusion

Chr. Day, ITP; M. Glugla, HVT; G. Janeschitz, FUSION

Einleitung

In der evakuierten Brennkammer eines Fusionsreaktors werden in einem nuklearen Prozess – ähnlich dem in der Sonne – die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium unter Energiegewinn bei Temperaturen von etwa hundert Millionen Grad in einem durch sehr hohe Magnetfelder eingeschlossenen Plasma zu Helium verschmolzen. Dabei können die physikalisch-technischen Reaktionsbedingungen zur Energiefreisetzung innerhalb des Plasmas nur aufrecht erhalten werden, wenn der Gas-

durchsatz sehr hoch ist und jeweils nur wenige Prozent des eingespeisten Deuteriums und Tritiums durch die Fusionsreaktion verbraucht werden. Die Brennstoffe werden daher im Fusionsreaktor in einem geschlossenen Brennstoffkreislauf prozessiert.

Das in Abb. 1 rot illustrierte, schlauchförmige Plasma ist von einem so genannten Brutblanket (gelblich) umhüllt. Unverbrauchtes Deuterium und Tritium werden zusammen mit dem Fusionsprodukt Helium kontinuierlich über Vakuumpumpen entfernt. In einem

inneren Brennstoffkreislauf wird dieses Helium gemeinsam mit durch Randprozesse gebildeten Begleitgasen abgetrennt und das gewonnene Gemisch aus reinem Deuterium und Tritium direkt zurück geführt. Während verbrauchtes Deuterium von außen ersetzt wird muss das radioaktive Tritium im Brutblanket der Reaktorbrennkammer selbst über Kernreaktionen aus Lithium gewonnen werden. In einem äußeren Brennstoffkreislauf wird das so erbrütete Tritium mit Hilfe von Helium aus dem Blanket herausgespült, abgetrennt und in

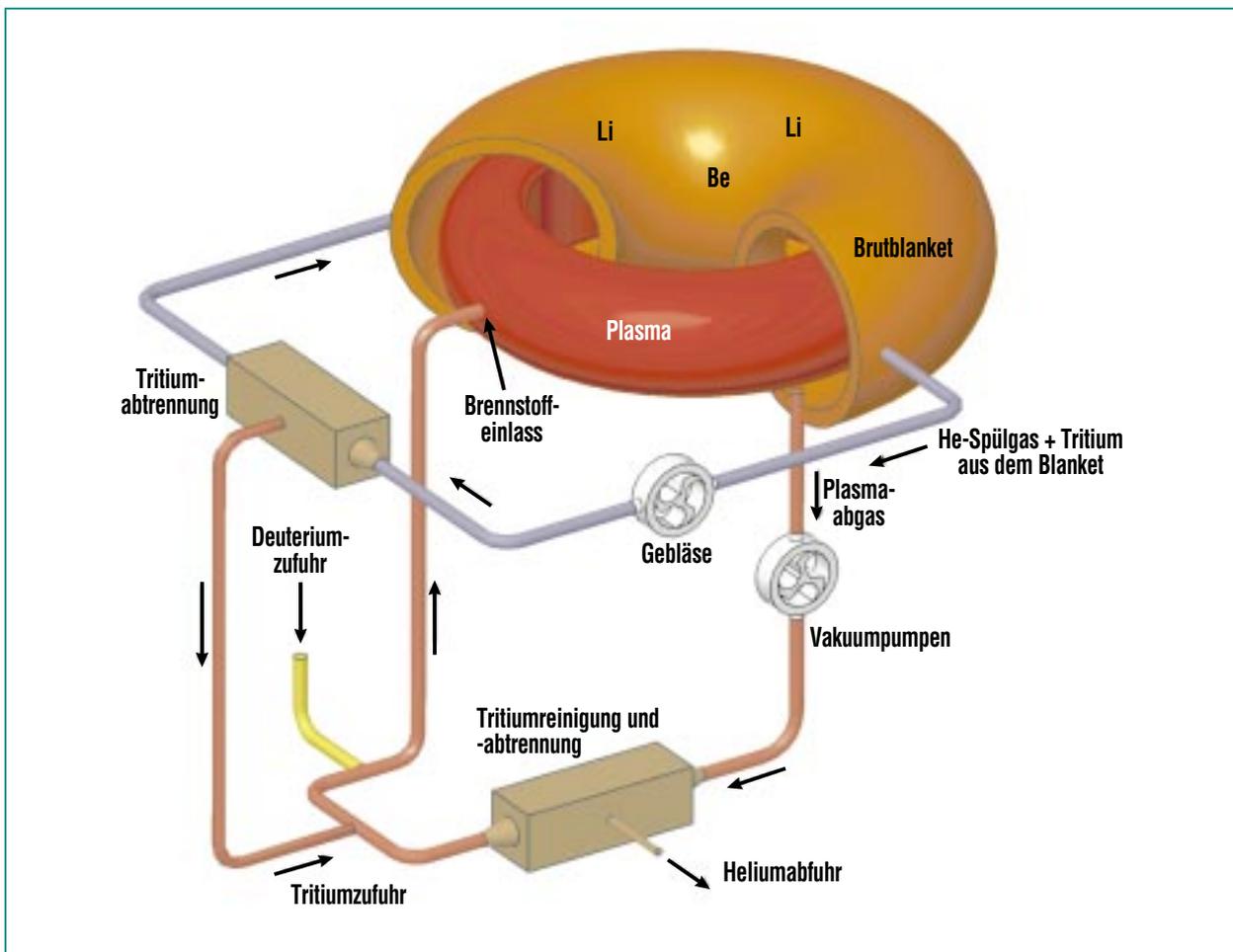


Abb. 1: Der Brennstoffkreislauf eines Fusionsreaktors gliedert sich in einen inneren (rot) und äußeren Teil (blau).

den inneren Brennstoffkreislauf eingeleitet.

Die für den Umgang mit regulärem Wasserstoff seit Jahrzehnten bewährten Techniken sind nur eingeschränkt auf den Umgang mit Deuterium und dem radioaktiven Tritium übertragbar. Ausführliche Kenntnisse und Erfahrungen im Bereich der fusionspezifischen Vakuumtechnik und der Tritiumtechnologie sind daher unabdingbare Voraussetzungen für den sicheren und wirtschaftlichen Betrieb eines Fusionsreaktors. Innerhalb des Forschungszentrums Karlsruhe beschäftigen sich speziell das Institut für Technische Physik (ITP) und das Tritiumlabor Karlsruhe der Hauptabteilung Versuchstechnik (HVT) seit mehr als einer Dekade mit diesen Technologien. Beide Arbeitsgruppen können

bis heute nicht nur auf umfangreiche Forschungsergebnisse verweisen, sondern testen auch prototypische Komponenten für den derzeit im Bau befindlichen Experimentalreaktor ITER [1].

Das Tritiumlabor Karlsruhe – Tritium sicher eingeschlossen

Das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) ist das einzige wissenschaftliche Labor in der Europäischen Union welches Tritium in technischem Maßstab für fusionstypische Anwendungen hantieren kann. Das Labor verfügt über einen geschlossenen Tritiumkreislauf mit verschiedenen Systemen und hat damit bereits in vielerlei Hinsicht Ähnlichkeit mit der ITER-Tritiumanlage. Hier wie dort wird Tritium gespeichert, durch die Handhabung mit Deuterium,

Helium und anderen Begleitgasen vermischt und verunreinigt, in einer Reinigungsanlage ein nur Wasserstoffisotope (Wasserstoff, Deuterium und Tritium) enthaltendes sauberes Gas erzeugt und letztlich in einer Isotopentrennanlage in reiner Form zurückgewonnen. Dabei muss das Tritium in allen Phasen aus ökonomischen und ökologischen Gründen in ultradichten Apparaturen eingeschlossen und mit großer Präzision gemessen und analysiert werden. Sowohl die Forschungsaktivitäten als auch die beim Betrieb der wissenschaftlich-technischen Infrastruktur des TLK gewonnenen Erfahrungen haben die Planung des ITER-Brennstoffkreislaufs bereits entscheidend beeinflusst. Abb. 2 zeigt in ausgewählten Bildern einige in Handschuhkästen installierte Tritiumsysteme.



Abb. 2: Die Tritiummesstechnik (oben links), das zentrale Rückhaltesystem (unten links) und die Isotopentrennanlage (rechts) des TLK.

Kryopumpen – heiße Gase kalt gefroren

Die hohen Brennstoffströme einer Fusionsanlage sind eine besondere Herausforderung für die Vakuumtechnik, da sowohl der Gasdurchsatz verkräftet werden als auch ein Hochvakuum zwischen den Plasmaentladungen aufrecht erhalten werden muss. Die zusätzlichen speziellen Anforderungen eines Fusionsexperimentes an die angeschlossenen Vakuumsysteme (Magnetfelder, Tritiumkompatibilität, Wartungsfreiheit) können dabei nur von großen, spezifisch entwickelten Kryopumpen erfüllt werden.

Kryopumpen sind Vakuumpumpen, die auf kryogenem Weg Vakuum erzeugen. Sie nutzen das Prinzip aus, dass alle Gase kon-

densieren bzw. an den vorhandenen Oberflächen adsorbieren, wenn die Temperaturen nur tief genug gewählt werden. Die Gase werden gebunden, verschwinden somit aus der Gasphase und der Gasdruck nimmt entsprechend ab. Die kalten Flächen der ITER-Kryopumpen sind mit speziellen Aktivkohlen beschichtet, die für die gleichzeitige Sorption von Helium und den Wasserstoffisotopen optimiert wurden.

Kryopumpen zeichnen sich durch ihre große Flexibilität im Design und ein sehr großes Saugvermögen bei einem sehr kleinen erreichbaren Enddruck aus. Sie sind daher perfekt für Anwendungen in der Kernfusion geeignet. Aus diesem Grund werden sie nicht nur zum Pumpen der Brennkammer in allen dort vorkommenden Betriebsmoden verwendet, sondern auch für andere plasmanaher Systeme (Plasmaheizung, Brennstoffzufuhr). Ein weiterer Vorteil von Kryopumpen ist die Möglichkeit, sie in Form und Design optimal auf die gegebenen Platzverhältnisse anpassen zu können. Dafür wurden am Forschungszentrum die nötigen Auslegungswerkzeuge entwickelt, so dass jeder diskutierte Designentwurf schnell und begründet bewertet werden kann. Abb. 3 zeigt beispielhaft die ITER-Modellpumpe im Maßstab 1 : 2 sowie eine kürzlich für das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik entwickelte Kryopumpe zum Test der ITER-Neutralteilchen-Plasmaheizung.

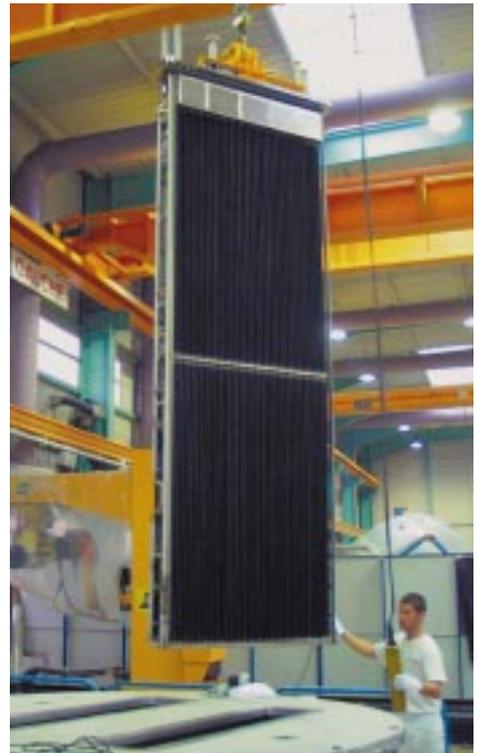


Abb. 3: Beispiele für am Forschungszentrum ausgeführte Kryopumpen für die Kernfusion: Die zylindrische Modellpumpe für ITER (oben links mit Blick auf die Ventilseite, unten beim Einbau) und die Rechteckpumpe für die Plasmaheizung (rechts).

Ausblick

Dem Forschungszentrum Karlsruhe fällt bei der Planung, dem Aufbau und der Inbetriebnahme der Tritiumanlage von ITER eine Schlüsselrolle zu. Mit den Forschungsergebnissen aus mehr als zehn Jahren auf dem Gebiet der Vakuum- und der Tritiumprozesstechnik wurden die Voraussetzungen geschaffen, Systeme und Komponenten zuverlässig für ITER skalieren zu können. Zusätzliche Schwerpunkte der Arbeitsfelder des Tritiumlabors und der am Institut für Technische Physik betei-

ligten Abteilungen werden neben konstruktionsbegleitenden Forschungsarbeiten auch Systemdesign, Projektverfolgung und Fertigungsbegleitung bis hin zur Inbetriebnahme von ITER sein. Die technologie-orientierten Beiträge und die große Erfahrung des Forschungszentrums auf dem Gebiet des Brennstoffkreislaufs sind ein Schlüsselement zum Erfolg von ITER.

Literatur

[1] <http://www.iter.org/>

Weltrekorde in der Gyrotronforschung

G. Dammertz, B. Piosczyk, M. Thumm, IHM

Einleitung

Für die Heizung von Fusionsplasmen stehen verschiedene Methoden zur Verfügung: die Ohmsche Heizung, die Neutralteilcheninjektion und die Einstrahlung elektromagnetischer Wellen (HF-Wellen).

Die Absorption von HF-Wellen in einem Plasma ist besonders stark, wenn Wellen und Ladungsträger in Resonanz schwingen. Die Frequenz von (nichtrelativistischen) Elektronen in einem Magnetfeld (Zyklotronfrequenz) ist linear abhängig vom Magnetfeld und beträgt bei 2,5 T (Magnetfeld bisheriger Fusionsplasmen) 70 GHz. Dabei koppelt die elektromagnetische Welle an die Elektronen an, weswegen man diese Art der Heizung auch Elektron-Zyklotron-Resonanz-Heizung (ECRH) nennt. Zum Betrieb mit höheren Plasmadichten ist es häufig vorteilhaft, mit der 1. Oberwelle bei 140 GHz zu heizen.

Gyrotronentwicklung

Die Entwicklung von HF-Quellen (Gyrotrons) begann im Forschungszentrum in den Jahren 1983/1984. Das Entwicklungsziel war die Erzeugung einer Leistung von 200 kW bei 150 GHz; jedoch wurde die Frequenz bald an die existierenden Tokamakanlagen wie z. B. ASDEX und den Stellarator W7-AS in Garching auf 140 GHz angepasst.

In der Elektronenkanone eines Gyrotrons (Abb. 1) werden thermisch Elektronen emittiert und mittels einer Hochspannung zum Resonator beschleunigt. Dort wird ein großer Teil der kinetischen in elek-

tromagnetische Energie umgewandelt.

Als Schwingungsmode des ersten Gyrotrons wurde die TE_{03} -Mode gewählt (Abb. 2). Dieses Gyrotron besaß noch ein axiales Auskoppelfenster aus zwei Saphirscheiben, deren Abstand zur Reduktion von Reflexionen variiert werden konnte. Damit wurde in Kurzpuls-experimenten eine Leistung von 300 kW erreicht. Mit diesem Gyrotron wurden weltweit erstmalig

Heizexperimente und Stromtrieb-experimente bei einer Frequenz von 140 GHz durchgeführt, und zwar am Stellarator W7-AS des Max-Planck-Instituts für Plasma-physik in Garching. Die ins Plasma eingestrahlte HF-Leistung betrug 120 kW für 0,4 s (im Dauerbetrieb) bzw. 1 s bei einem Tastverhältnis von 50 %.

Schon bald wurde der Wunsch nach höheren Leistungen laut. Um dabei die Ohmschen Wandverluste

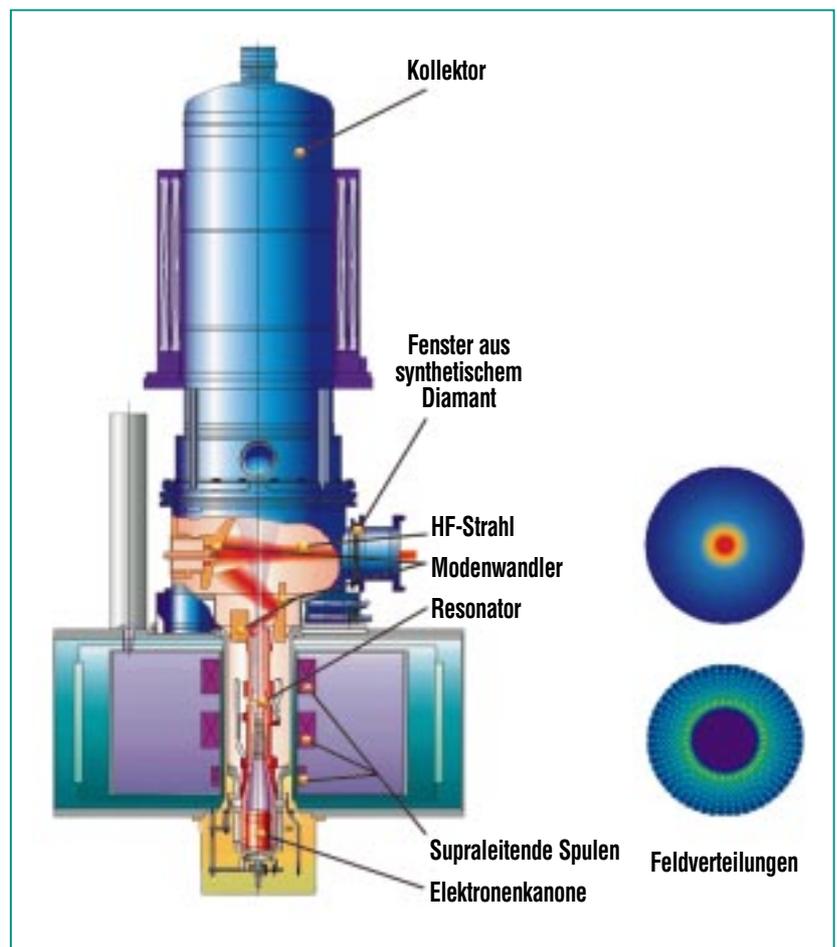


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Gyrotrons mit der Elektronenkanone, dem supraleitenden Magnetsystem, dem Resonator, dem Modenwandler, dem Diamantfenster und dem Kollektor. Auf der rechten Seite ist die Feldverteilung am Auskoppelfenster (oben) und im Resonator (unten) dargestellt. Die Umwandlung geschieht mittels des Modenwandlers.

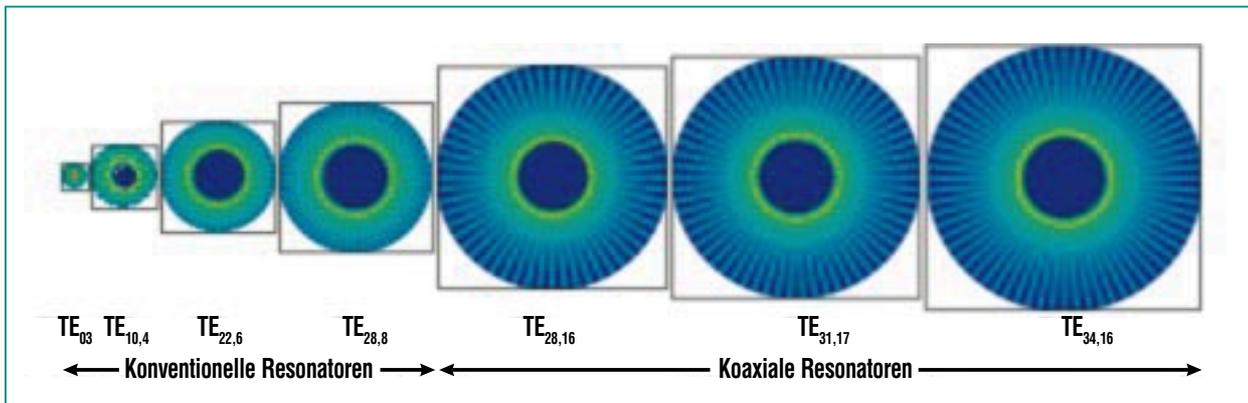


Abb. 2: Entwicklung der Resonatoren (maßstabsgetreu) und die Feldverteilung.

im Resonator in technisch akzeptablen Grenzen zu halten, müssen größere Resonatoren benutzt werden. Die nächste Generation, ein in der $TE_{10,4}$ -Mode betriebenes Gyrotron, erzeugte dann auch schon 700 kW bei einem Wirkungsgrad von 34 % bei Pulslängen bis zu 5 ms. Nachteilig war allerdings, dass der Kollektor gleichzeitig als Wellenleiter benutzt wurde, weswegen seine Geometrie nicht auf hohe Absorption optimiert werden konnte.

In einer Weiterentwicklung wurde das Gyrotron mit einem Modenwandler versehen, der die Resonatormode in einen Strahl mit Gaußscher Verteilung umwandelt und den HF-Strahl über ein Spiegelsystem auskoppelt, somit vom Elektronenstrahl räumlich abtrennt (Abb. 1). In dieser Anordnung lieferte die Röhre knapp 500 kW mit einem Wirkungsgrad von 34 % bei einer Pulslänge von 0,2 s. Dabei wurde auch erstmalig ein Kollektor mit Gegenpotenzial eingesetzt, der die Elektronen nach Durchlaufen des Resonators abbremst und so einen Teil der Energie zurück gewinnt. Diese Maßnahme führte zu einer Erhöhung des Wirkungsgrads auf 51 %.

Noch höhere Leistungen wurden in der dritten Gyrotron-Generation mit dem $TE_{22,6}$ -Gyrotron möglich mit Ausgangsleistungen von 2,1 MW bei einem Wirkungsgrad von 53 %. Mit Hilfe dieses Gyrotrons wurde erstmalig die Möglichkeit zur stufenweisen Frequenzveränderung untersucht. Die Frequenz der HF-Welle muss mit einer Eigenfrequenz des Resonators übereinstimmen, was nur für diskrete Frequenzen möglich ist. Da weiterhin die Frequenz etwa der Zyklotronfrequenz entsprechen muss, muss das Feld der supraleitenden Magnete variiert werden, was bisher nur langsam möglich ist. In einem weltweit ersten Experiment wurde ein Quarzfenster eingesetzt, dessen Achse gegen die Strahlachse unter dem Brewsterwinkel geneigt war. Dadurch können für die linear polarisierten Wellen Reflexionen vollständig unterdrückt werden. Durch den Einbau des Brewsterfensters konnten im Frequenzbereich von 114 GHz bis 166 GHz Serien von HF-Wellen in einem Frequenzabstand von 3,7 GHz bei einer Leistung zwischen 800 und 1000 kW erzeugt werden. Durch den zusätzlichen Einbau eines normal-

leitenden Magneten konnte der Schaltzyklus in einem reduzierten Frequenzbereich auf 1s verkürzt werden.

Das Forschungszentrum erhielt 1998 den Auftrag, die ECRH für den neuen Stellarator W7-X in Greifswald aufzubauen. Eine wesentliche technische Forderung war dabei, die Pulslängen zu vergrößern. Die W7-X Gyrotrons werden in der $TE_{28,8}$ -Mode betrieben und sollen für 30 Minuten eine Leistung von 1 MW erbringen. Ein kritischer Punkt dabei sind die Fenster für eine HF-Dauerbelastung von mehr als 1 MW bei Raumtemperatur. Als geeignetes Material stellte sich künstlicher Diamant (chemical vapor deposited diamond: CVD-Diamant) heraus. Die neue Technologie für HF-Fenster wurde in einer Zusammenarbeit zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe (IHM und IMF I), dem „Japanese Atomic Energy Research Institute“, Japan, und DeBeers, UK, eingeführt.

Diese Entwicklung der W7-X-Röhren war derartig erfolgreich, dass bei der Firma Thales Electron Devices (TED) mit der Serienfertigung der Gyrotrons (Abb. 3) begonnen



Abb. 3: Foto des $TE_{28,8}$ -Gyrotrons für W7-X im Teststand des Forschungszentrums.

werden konnte. Das erste Serienmodell lieferte im Teststand des Forschungszentrums Karlsruhe eine Ausgangsleistung von 920 kW für drei Minuten (Begrenzung durch die Hochspannungsanlage), und 540 kW für 30 Minuten. Dieses Gyrotron wurde inzwischen an das IPP Greifswald geliefert und erzielte auch dort eine Ausgangsleistung von 920 kW, allerdings bei einer Pulslänge von 30 Minuten. Dieses Gyrotron hat damit den weltweit größten Energieinhalt pro Puls in diesem Frequenzbereich demonstriert.

Eine Ausgangsleistung von weit mehr als 1 MW erscheint zur Zeit mit herkömmlichen Resonatoren kaum möglich, da die Frequenzabstände mit zunehmender Größe kleiner werden und damit eine Trennung zwischen konkurrieren-

den Moden schwieriger wird. Einen Ausweg bietet der Übergang zu koaxialen Resonatoren. Durch Einführung eines Innenleiters in den Resonator kann der Modenabstand günstig beeinflusst werden.

Die grundsätzlichen Probleme von Gyrotrons mit koaxialem Resonator werden seit 1996 im Forschungszentrum Karlsruhe untersucht. Dabei wird der Innenleiter zur besseren Unterdrückung unerwünschter Moden konisch ausgeführt und mit Längsrillen versehen. Ein erstes Gyrotron mit koaxialem Resonator wurde bereits bei 140 GHz in der $TE_{28,16}$ -Mode betrieben. Die weiteren Entwicklungen wurden auf die Anforderungen von ITER (International Experimental Thermonuclear Reactor) mit einer Frequenz von 170 GHz abgestimmt.

Wegen der Begrenzung des Feldes bei dem vorhandenen supraleitenden Magneten wurden die Untersuchungen an einem koaxialen, in der $TE_{31,17}$ -Mode betriebenen Gyrotron zunächst bei 165 GHz durchgeführt. Das Gyrotron war für 1,5 MW ausgelegt, lieferte jedoch im Kurzpulsbetrieb eine Weltrekord-Ausgangsleistung von 2,2 MW. Die Entwicklung eines 170 GHz koaxialen $TE_{34,19}$ -Gyrotrons mit einer Mikrowellenleistung von 2 MW im Dauerbetrieb wurde in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Technischen Hochschule (EPFL) in Lausanne begonnen. Die Prototypversion wird zur Zeit bei TED gebaut, die Tests werden bei EPFL durchgeführt. Im Forschungszentrum Karlsruhe wird ein nahezu identisches Kurzpuls-gyrotron getestet, mit dem die Auslegung einzelner Komponenten des Gyrotrons überprüft wird.

Zusammenfassung

Die jahrelange Erfahrung beim Bau und Test von Gyrotrons machte das Forschungszentrum zu einem weltweit führenden Institut in der Gyrotronentwicklung. Die Entwicklungsarbeiten begannen mit der Erforschung physikalischer Probleme bei kurzen Pulsen. Die Forschungsergebnisse werden nun konkret umgesetzt; die erste technische Anwendung ist die Heizung für den Stellarator W7-X. Die große Herausforderung heute besteht in der Entwicklung koaxialer Gyrotrons für ITER.

Weltrekord bei der Hochtemperatursupraleitung

W. H. Fietz, R. Heller, P. Komarek, R. Lietzow, G. R. Zahn, ITP

Einleitung

Mit der Entdeckung der Hochtemperatursupraleiter (HTSL) im Jahre 1986 waren große Erwartungen geweckt worden, da diese Materialien bei vergleichsweise hohen Temperaturen einen elektrischen Strom ohne Verluste transportieren können. Insbesondere die damit mögliche Kühlung mittels flüssigen Stickstoffs bei etwa 80 K war viel versprechend, konnte aber aufgrund der schwierigen Herstellung geeigneter Leiter nicht umgesetzt werden. Mittlerweile sind industriell hergestellte HTSL verfügbar, die aber bislang eher bei kleinen Strömen eingesetzt wurden.

Entwicklung einer HTSL-Stromzuführung für ITER

Im Rahmen der Arbeiten zum Fusions-Forschungsreaktor ITER¹⁾, der in Südfrankreich gebaut werden soll, hat das Forschungszentrum Karlsruhe in Zusammenarbeit mit dem Centre de Recherches en Physique des Plasmas der Eid-

genössischen Technischen Hochschule in Lausanne, Schweiz, nunmehr eine Stromzuführung auf Basis eines Hochtemperatursupraleiters entwickelt, die einen elektrischen Strom von 70.000 Ampere tragen und sowohl mit Heliumgas als auch mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden kann.

Da die Brenntemperatur des energieerzeugenden Plasmas in einem Fusionskraftwerk bei ca. 100 Millionen °C liegt, muss eine besonders wirkungsvolle thermische Isolierung für die Wand des Plasmagefäßes vorgesehen werden. Das aus Stahl hergestellte Gefäß darf eine Temperatur von einigen Hundert Grad Celsius nicht überschreiten. Aus diesem Grund werden hohe Magnetfelder benötigt um das energieerzeugende heiße Plasma einzuschließen. Hierzu dienen große elektrische Spulen, die aber nur im supraleitenden Zustand wirtschaftlich betrieben werden können. Um den supraleitenden Zustand zu erreichen, müssen die Spulen mit Helium auf Temperaturen um 4,5 K abgekühlt werden.

Zum Betrieb dieser supraleitenden Spulen sind sogenannte Stromzuführungen nötig, die die stromtragende Verbindung zu der auf Raumtemperatur befindlichen Stromversorgung darstellen und für die ein Großteil der zur Verfügung stehenden Kälteleistung aufgewendet werden muss. Deshalb ist man bestrebt, diese Verluste zu minimieren. Durch die Entdeckung der HTSL gibt es nun die Möglichkeit, Stromzuführungen bei weit höheren Temperaturen, z. B. bei denen des flüssigen Stickstoffs, und infolgedessen mit weitaus höherem thermodynamischem Wirkungsgrad zu betreiben. Zusätzlich bedingt die sehr geringe thermische Leitfähigkeit des Supraleitermaterials eine weitere Reduzierung der Verluste um bis zu einem Faktor 10 bei der Betriebstemperatur der supraleitenden Spulen.

Die Hochtemperatursupraleiter-Stromzuführung wurde als Modell zum Einsatz für ITER konzipiert und besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen, einem HTSL-Modul und einem herkömmlichen mit Heliumgas gekühlten Kupferwär-

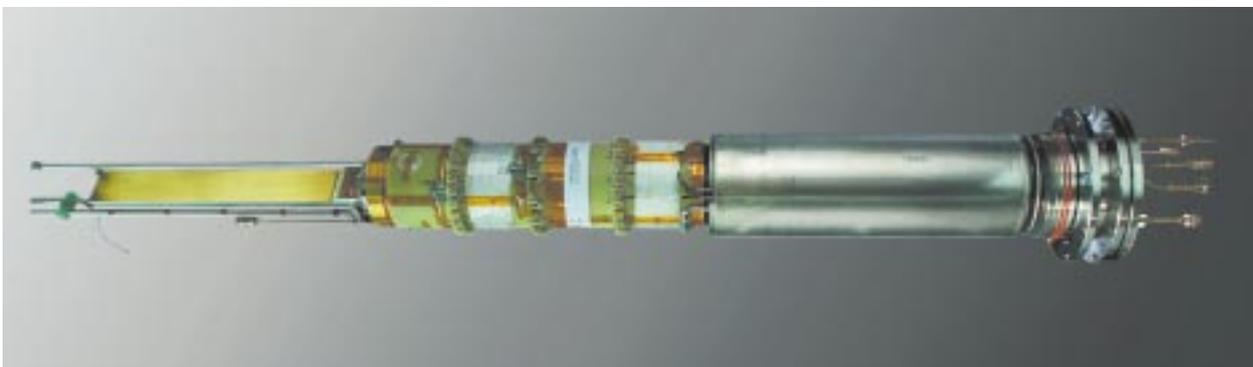


Abb. 1: Die am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte Hochtemperatursupraleiter-Stromzuführung hat eine Länge von 2 m. Eine derartige Stromzuführung soll nun auch bei ITER eingesetzt werden.

¹⁾ International Thermonuclear Experimental Reactor



Abb. 2: Die HTSL-Stromzuführung vor dem Einbau in den Testkryostaten.

metauscher [1]. Das HTSL-Modul besteht aus über 1000 Wismut-Supraleiterbändern (jedes Band besteht aus $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ -Filamenten in einer Silber-Gold-Matrix) und wurde in Zusammenarbeit mit der Firma American Superconductor gebaut. Der Wärmetauscher wurde im Forschungszentrum gefertigt und basiert auf dem in konventionellen Stromzuführungen bis 80.000 A bereits erfolgreich eingesetzten Prinzip. Abb. 1 zeigt die HTSL-Stromzuführung ohne Einbaustruktur, während in Abb. 2 die Stromzuführung kurz vor dem Einbau in den Testkryostaten dargestellt ist.

Die HTSL-Stromzuführung wurde bis zu einem Maximalstrom von 80.000 A ohne Probleme betrieben. Dies ist der bisher höchste mit Hochtemperatursupraleitern transportierte elektrische Strom. Beim nominellen Betriebsstrom der Toroidalfeldspulen von ITER von 68.000 A und einer Heliumgaseintrittstemperatur von 50 K, was ei-

ner maximalen Betriebstemperatur des HTSL von 65 K entspricht, konnte der Wirkungsgrad um den Faktor 3,7 erhöht werden; für einen typischen Stromzyklus von ITER erhöht sich dieser Faktor auf 5. Nach einem simulierten Kühlmittelausfall beim vollen Betriebsstrom von 68.000 A konnte die Stromzuführung über 5 Minuten lang weiter betrieben werden, bevor sich der Supraleiter so weit erwärmt hatte, dass er in die Normalleitung überging und der Strom abgeschaltet werden musste [2].

Darüber hinaus war es möglich die Stromzuführung beim Nominalstrom von 68.000 A sogar mit 80 K Heliumgas stabil zu betreiben. Die Verwendung von 80 K warmen Heliumgases wäre vorteilhaft, weil bei ITER eine riesige Kälteleistung bei 80 K verfügbar ist um das Strahlungsschild zu kühlen. Allerdings ist bei einem solchen Betrieb kein großer Sicherheitsfaktor mehr vorhanden, was im Störfall eine sofortige Schnellabschal-

tung des Magnetsystems erforderlich macht [2].

Eine Alternative zur Heliumkühlung ist der Betrieb mit flüssigem Stickstoff. Für die Stromzuführungen hätte dies den Vorteil, dass die Kühlung unabhängig vom Heliumkühlkreislauf für die Spulen ist. In einem Test konnte auch dieser Betrieb mit der HTSL-Stromzuführung erfolgreich demonstriert werden. Der mit Stickstoffkühlung erreichte Wirkungsgrad war mit dem der 50 K Heliumkühlung vergleichbar, auch ein Kühlmittelausfall bei 68.000 A konnte erfolgreich beherrscht werden. Allerdings ist die Temperaturmarge für das mit flüssigem Stickstoff gekühlte HTSL-Modul ähnlich gering wie bei der 80 K Heliumkühlung [2].

Im derzeitigen ITER-Design ist der Einsatz von konventionellen Stromzuführungen aus Kupfer vorgesehen. Die erfolgreichen Ergebnisse dieses Entwicklungsprogramms haben jetzt zu dem Vorschlag geführt, die neuartigen Stromzu-

führungen einzusetzen. Dabei wird die 50 K Heliumkühlung favorisiert, weil sie eine größere Flexibilität verspricht und durch die größere Temperaturmarge eine geringere Menge an HTSL-Material benötigt wird. Durch den Einsatz der neuartigen HTSL-Stromzuführungen würden sich die Betriebskosten von ITER um jährlich 800.000 Euro verringern. Zusätzlich könnten die höheren Baukosten durch Einsparungen bei den Kosten für die Kälteanlage kompensiert werden.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Europäischen Fusionstechnologieprogramms hat das Forschungszentrum Karlsruhe zusammen mit dem CRPP, Schweiz, eine HTSL-Stromzuführung entwickelt, die einen elektrischen Strom von 70.000 Ampere trägt und sowohl mit Helium als auch mit

flüssigem Stickstoff gekühlt werden kann. Solche Stromzuführungen werden z. B. benötigt, um den Strom von Raumtemperatur auf die tiefe Temperatur der supraleitenden Spulen des Fusions-Forschungsreaktors ITER zu übertragen, die bei 4,5 Kelvin (das entspricht $-268,5$ Grad Celsius) betrieben werden. Durch die Verwendung der Hochtemperatursupraleiter kann die benötigte Kälteleistung massiv verringert werden, wodurch die Effizienz künftiger Anlagen deutlich gesteigert wird. Die neu entwickelte Stromzuführung trägt weltweit den höchsten Strom, der bisher mit solchen Stromzuführungen übertragen werden konnte. Mittlerweile gibt es Pläne, die neuartigen Stromzuführungen in ITER, der im südfranzösischen Cadarache aufgebaut wird, zu verwenden.

Literatur

- [1] R. Heller, S. Fink, G. Friesinger, A. Kienzler, A. Lingor, G. Schleinkofer, M. Süsler, A. Ulbricht, F. Wüchner, G. Zahn, „Development of forced flow cooled current leads for fusion magnets“, *Cryogenics*, 41, 2001, pp 201-11
- [2] R. Heller, W.H. Fietz, R. Lietzow, V.L. Tanna, A. Vostner, R. Wesche, G. Zahn, „70 kA High Temperature Superconductor Current Lead Operation at 80 K“, *Proceedings of the 19th Intern. Conf. on Mag. Techn. (MT-19)*, Sept. 18-23, 2005, Genova, Italy, to appear in *IEEE Trans. Appl. Supercond.*

Sicherheitsforschung für Kernreaktoren

W. Scholtyssek, W. Tromm, Programm Nukleare Sicherheitsforschung

Einleitung

Der sichere Betrieb von Kernkraftwerken in Deutschland erfolgt entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik und verlangt im Sinne der staatlichen Vorsorge eine kontinuierliche Vertiefung von FuE-Arbeiten zur Reaktorsicherheit. Hierzu werden im Forschungszentrum Karlsruhe eine Reihe von theoretischen und experimentellen Untersuchungen zu Auslegungs- und auslegungsüberschreitenden Störfällen von Leichtwasserreaktoren sowie deren radiologischen Konsequenzen durchgeführt.

Unfallszenarienanalyse

Um die Bewertung von Auslegungsstörfällen zu verbessern und eventuelle Risiken zu verringern, werden im Forschungszentrum

Karlsruhe sowohl deterministische Methoden zur Analyse von Unfallszenarien als auch probabilistische Verfahren für Risiko- und Zuverlässigkeitsanalysen herangezogen. Zur Validierung und stetigen Weiterentwicklung der Programme werden geeignete Experimente analysiert und die Extrapolationsfähigkeit auf Reaktorbedingungen anhand von internationalen Vergleichsstudien, sogenannten „Benchmarks“, überprüft (Abb. 1). In den letzten Jahren wurden zahlreiche fortgeschrittene Programmsysteme zur Beschreibung der Thermohydraulik mit dreidimensionalen Neutronenkinetik-Modellen gekoppelt. Solche gekoppelten Systemcodes werden im Forschungszentrum angewandt, um komplexe Störfälle mit starken räumlichen Unterschieden der Leistungsverteilung im Kern zu untersuchen [1]. Dadurch kön-

nen sicherheitsrelevante lokale Parameter bestimmt und somit Sicherheitsreserven genauer ermittelt werden.

Neben der Anwendung von Systemcodes zur Sicherheitsanalyse werden auch in zunehmendem Maße CFD-Programme eingesetzt, um die komplexen mehrdimensionalen Strömungs- und Wärmeübertragungsbedingungen z. B. im Reaktordruckbehälter zu erfassen, parallel werden dazu grundlagenorientierte Entwicklungen verfolgt, um z. B. empirische Korrelationen für die Blasen-induzierte Turbulenz auf eine bessere Basis zu stellen [2].

Die Anforderungen an die Sicherheit auch im Falle auslegungsüberschreitender Störfälle wurden zunehmend erhöht, sodass in Deutschland für die laufenden Reaktoren zusätzliche Maßnahmen

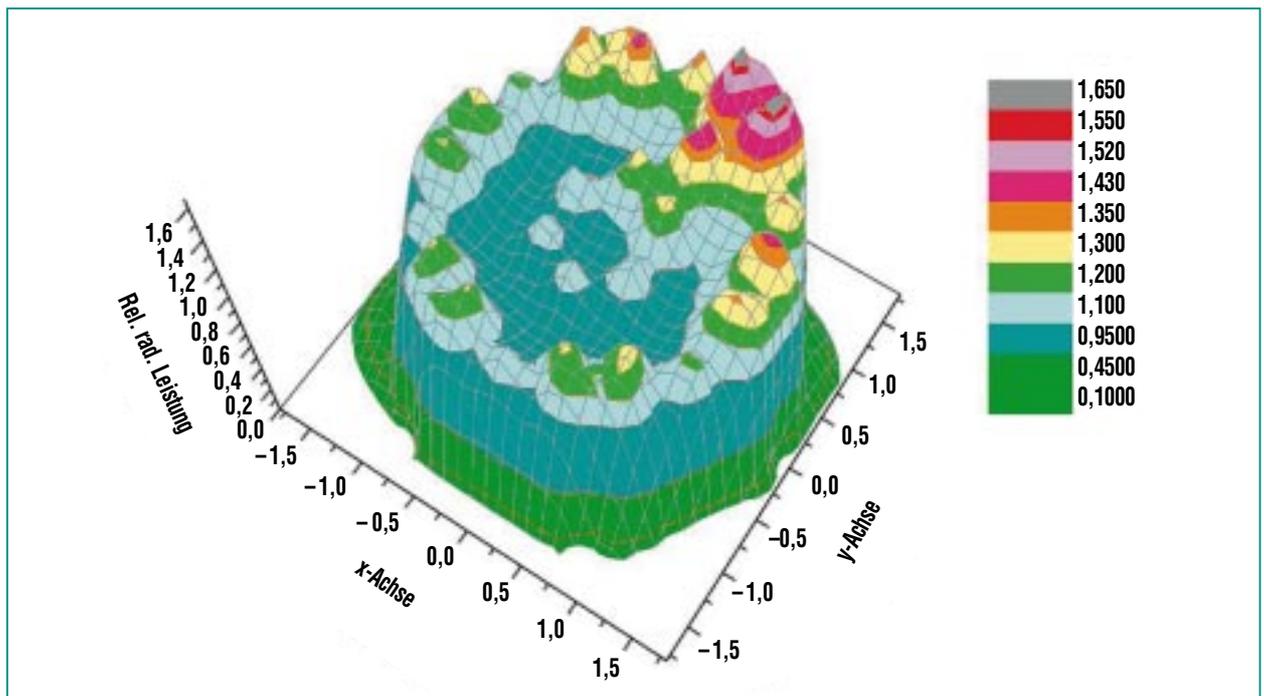


Abb. 1: OECD/NEA VVER-1000 Phase-1 Benchmark: Simulation der Leistungsverteilung im Reaktordruckbehälter bei Wiederanfahren einer Kühlmittelpumpe bei angenommenem Steuerstababwurf.

ergriffen wurden, die einerseits die Eingriffsmöglichkeiten beim Unfall verbessern und andererseits die eventuelle Freisetzung von Radioaktivität nach außen stark verringern. Diese Maßnahmen, basierend auf einem vertieften Verständnis des Unfallablaufs, wurden ganz wesentlich im Forschungszentrum Karlsruhe mit zum Teil einzigartigen großen Versuchsanlagen und den komplementären theoretischen Analysen mitentwickelt [3]. Anhand einiger ausgewählter Beispiele soll dies im Folgenden näher erläutert werden.

Wasserstoff-Experimente

In Siedewasserreaktoren (SWR) entstehen während des Betriebs durch strahlungsbedingte Spaltung von Wasser erhebliche Mengen an Radiolysegas ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$). Die Gaskonzentrationen im Frisch-

dampf sind zwar sehr gering, aber in nicht permanent durchströmten Anschlussleitungen zum Primärkreis kann Dampf kondensieren und das dabei zurückbleibende, nicht kondensierbare Radiolysegas kann sich über Wochen und Monate auf hohe Partialdrücke anreichern (Abb. 2). In deutschen SWR befinden sich viele, nicht permanent gespülte Messleitungen, die im Extremfall mit 70 bar Radiolysegas gefüllt sein könnten. Einfache Abschätzungen zeigten, dass diese sogenannten DN-15-Leitungen wegen ihrer hohen Wandstärke eventuell auch einer Radiolysegasdetonation bei 70 bar Ausgangsdruck standhalten könnten. Unsicher war insbesondere das komplizierte strukturmechanische Verhalten von Rohrbiegungen. Im Auftrag der deutschen SWR-Betreiber wurden deshalb im Forschungszentrum Detonationsversuche mit Radiolysegas in einem

U-förmig gebogenen DN-15-Testrohr durchgeführt [4]. Alle Komponenten, die während der Versuchsdurchführung Radiolysegas enthalten, wurden in einem Sicherheitsbehälter untergebracht. Insgesamt wurden 31 Versuche mit Radiolysegas bei Ausgangsdrücken von 0,5 bis 70 bar durchgeführt. Als wesentliches Ergebnis der Versuche ist festzuhalten, dass das DN-15-Versuchsrohr unreflektierten Detonationslasten bis zu 70 bar Anfangsdruck standhielt. Damit ist der experimentelle Nachweis erbracht, dass dieser Rohrtyp selbst im Extremfall bei einer Detonation nicht versagen würde. DN-15-Leitungen können damit aus den Überwachungsprogrammen in deutschen SWR-Anlagen entlassen werden, wenn sie in ein offenes System münden (keine Reflektion). Weiterhin ist es nicht mehr erforderlich, bei Anzeichen von Radiolysegasansamm-

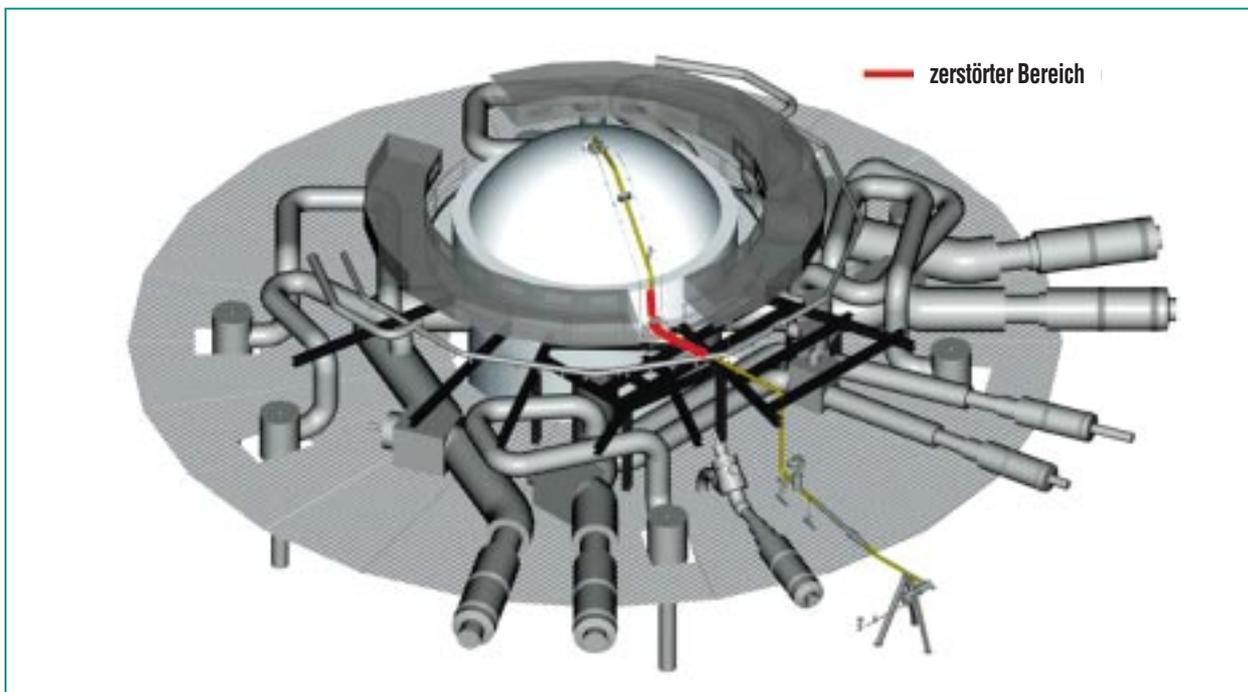


Abb. 2: Zerstörter Bereich einer Deckelsprühleitung in einem SWR.

lungen in solchen Leitungen vor- sorglich den Leistungsbetrieb ein- zustellen, um Gegenmaßnahmen einzuleiten.

QUENCH-Experimente

Das Fluten des überhitzten Reak- torkerns mit Wasser ist eine der wichtigsten Unfallmaßnahmen für einen auslegungsüberschreiten- den Störfall. Bei diesem Vorgang

kann es aber aufgrund der exo- thermen chemischen Reaktionen zwischen dem entstehenden Was- serdampf und den Zircaloy-Bren- nementhüllrohren zu einer tem- porären Temperatureskalation un- ter gleichzeitiger Bildung von Was- serstoff kommen. Um diesen Was- serstoffquellterm zu ermitteln, wer- den in der QUENCH-Versuchsan- lage des Forschungszentrums (Abb. 3) unter verschiedenen Ver-

suchsbedingungen für DWR-, SWR- und russische WWER-Brennele- mente Out-of-pile-Experimente, d. h. Simulationsexperimente au- ßerhalb eines Reaktors, durchge- führt [5]. Dabei wird ein umfang- reich instrumentiertes Simula- tionsbündel in oxidierender At- mosphäre auf Temperaturen von 1500 bis 2000 °C aufgeheizt und anschließend mit Wasser oder Dampf abgeschreckt. Bisher wur- den 11 solcher Integral-Experi- mente durchgeführt. Bei einem Teil der Versuche war das Fluten mit Wasser bzw. das Abschrecken mit Dampf erfolgreich und führte zur sofortigen Temperaturabsenkung und somit nur zu einer geringen zu- sätzlichen Wasserstoffproduktion. Bei anderen Versuchen wurde da- gegen mit Beginn der Abschreck- phase eine Temperatureskalation verbunden mit der Freisetzung von Wasserstoff beobachtet. Diese ex- perimentellen Arbeiten werden kontinuierlich durch theoretische Arbeiten an den Wechselwirkungs- und Freisetzungsmodellen der Sys- temcodes zur Simulation des Re- aktorverhaltens begleitet, sodass aufgrund der Ergebnisse der Ex- perimente Handlungsempfehlun- gen für Reaktorbetreiber abgelei- tet werden können [6].

Direct-Containment- Heating-Experimente

Versagen bei einem solchen an- genommenen auslegungsüber- schreitenden Störfall auch lang- fristig alle Kühlungsmöglichkei- ten, bildet sich zunächst inner- halb des Reaktordruckbehälters (RDB) eine Schmelze aus, die nach eini- ger Zeit auch den Druckbehälter durchschmelzen könnte. Die Schmelze kann aus dem Druck-



Abb. 3: QUENCH-Bündel nach dem Versuch: Heißester Bereich mit oxidierten Brennstabhüllrohren und teilweise geschmolzenem Dampfleitungsrohr.

behälter im Zentrum der Bodenklotte oder durch seitliches Versagen etwa in Höhe der Schmelzenoberfläche austreten. Falls der Druck des Primärkreises auf deutlich unter 20 bar erfolgreich entlastet wurde, können die Reaktionskräfte bei RDB-Versagen von den Auflagern des RDB abgetragen werden. Die Schmelze kann jedoch zu wesentlichen Teilen aus der Reaktorgrube ausgetragen und in den Sicherheitsbehälter verlagert werden. Diese Vorgänge werden im Forschungszentrum in den DISCO-Experimenten (DISPersion von COrium) mit dem Ziel untersucht, mögliche Gefährdungen für die Integrität des Reaktorsicherheitsbehälters und Gegenmaßnahmen dazu aufzuzeigen [7]. In einer 1:18 skalierten Geometrie wird die Kernschmelze durch kalte Modellflüssigkeiten oder heiße Thermo-schmelzen ($T > 2000\text{ °C}$) (Abb. 4) simuliert. Versagt der RDB am Boden, können bei Drücken nahe 20 bar bis zu 75 % der Schmelze aus der Reaktorkaverne ausgetragen werden. Bei Restdrücken unter 5 bar sinkt dieser Anteil unter 10 %. Bei seitlichem Versagen ist der Schmelzeaustrag wesentlich geringer. Durch Wärmeübergang von den kleinen Schmelzetröpfchen an die Atmosphäre im Sicherheitsbehälter und durch die Verbrennung des Wasserstoffes, der durch die Reaktion des metallischen Teils der Schmelze mit dem Dampf erzeugt wird, kann sich der Druck im Sicherheitsbehälter kurzzeitig um 2 bis 4 bar erhöhen. Ist der direkte Weg aus der Reaktorgrube in den Sicherheitsbehälter versperrt, und nur eine Verbindung in die relativ engen Pumpen- und Dampferzeugerräume vorhanden, so ist die Wasserstoffherzeugung

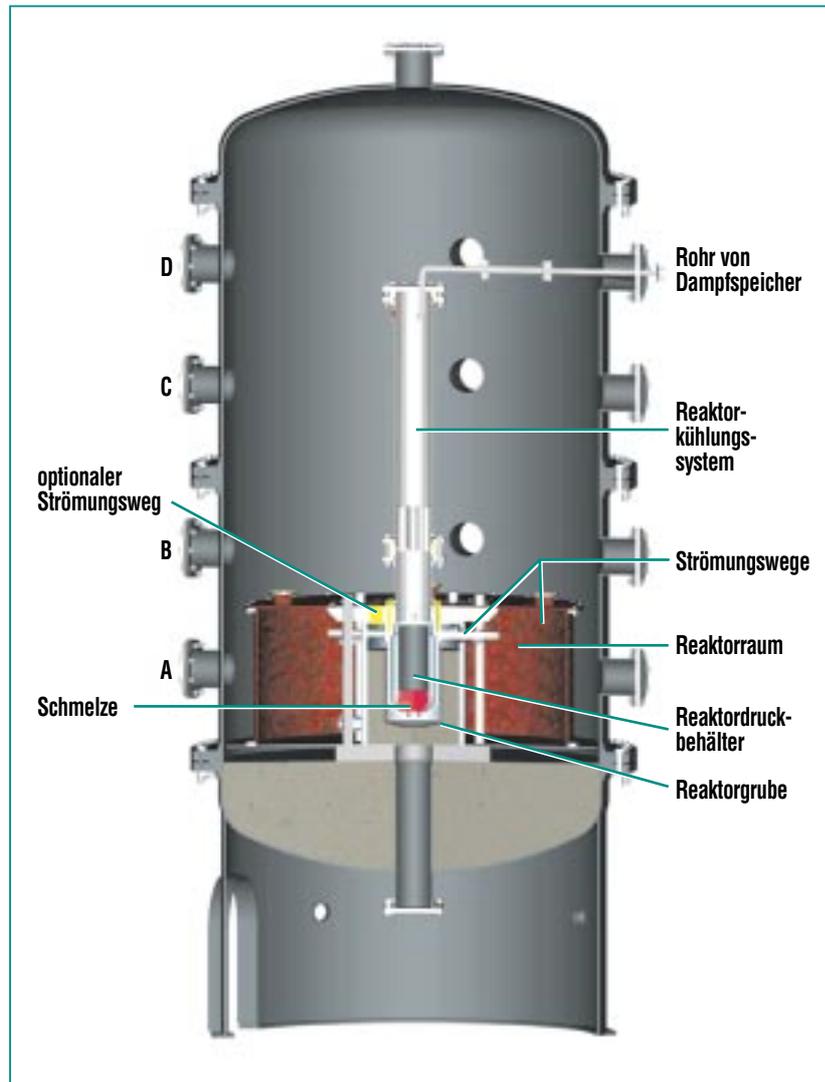


Abb. 4: Die Versuchsanlage DISCO mit skaliertem Reaktordruck-behälter und Kühlsystem.

und -verbrennung geringer. Damit vermindern sich auch der Energieeintrag in die Atmosphäre und der Druckanstieg.

Die ausgewählten hier dargestellten und weitere Experimente mit den begleitenden Entwicklungen von Rechenprogrammen erhöhen wesentlich die Kenntnisse über den Ablauf von Auslegungs- und auslegungsüberschreitenden Störfällen, aber auch über Eingriffs-

möglichkeiten zur Unfallminderung. Damit leisten diese Arbeiten einen Beitrag zum weiteren, sicheren Betrieb der existierenden Reaktoren. Die internationale Einbindung und der intensive Austausch mit Ländern innerhalb und außerhalb Europas mit Förderung durch die Europäische Union unterstützen damit die Absicherung eines international hohen Sicherheitsniveaus der Leichtwasserreaktoren.

Literatur

- [1] V. Sanchez, M. Böttcher,
*Proceedings of the 11th International
Topical Meeting on Nuclear Reactor
Thermal-Hydraulics (NURETH-11),
Avignon, France, Oct. 2005*
- [2] M. Ilic, M. Wörner, et al,
*Nuclear Science and Technology,
vol. 41, No. 3, pp 331-338,
March 2004*
- [3] Miassoedov, H. Alsmeyer, L. Meyer,
M. Steinbrück,
*FISA 2006, Conference on
EU-Research and Training in
Reactor Systems, Luxembourg,
March 2006*
- [4] W. Breitung, J. Grune, M. Kuznetsov,
*Proceedings of the 18th International
Conference on Structural Mechanics
in Reactor Technology (SMiRT 18),
Beijing, China, Aug. 2005*
- [5] L.K. Sepold, A. Miassoedov,
G. Schanz, U. Stegmaier,
M. Steinbrück, J. Stuckert,
C. Homann,
*Nuclear Technology, 147(2004)
S.202-15*
- [6] W. Hering, Ch. Homann,
*Degraded Core Quench:
Consequence Evaluation based
on available data, NURETH-11,
International Topical Meeting on
the Nuclear Reactor Thermal-
Hydraulics, October 2-6, 2005,
Avignon, France*
- [7] L. Meyer, D. Wilhelm, R. Meignen,
D. Plassart, C. Paroli,
*Proceedings of the 11th International
Topical Meeting on Nuclear Reactor
Thermal-Hydraulics (NURETH-11),
Avignon, France, Oct. 2005*



OBERMEYER

PLANEN + BERATEN GmbH

PLANUNGSGESELLSCHAFT FÜR BAU, UMWELT,
VERKEHR UND TECHNISCHE AUSRÜSTUNG

80686 München • Hansastraße 40 • Tel. 089/5799-0 • Fax: 089/5799-910 • Internet: www.opb.de • E-mail: info@opb.de

Hochbau
Ingenieurtechnik
Verkehrsinfrastruktur
Umwelt

Seit über 20 Jahren Partner im Forschungszentrum Karlsruhe
für Planung, Beratung, Bau- und Montageleitung

76185 Karlsruhe • Blücherstraße 20 • Tel. 0721/9802-0 • Fax: 0721/9802-599 • Internet: www.opb.de • E-mail: karlsruhe@opb.de

Verglasungseinrichtung Karlsruhe (VEK): Verglasung hochradioaktiver Abfalllösungen

J. Fleisch, WAK; G. Roth, S. Weisenburger, INE

Einführung

Eine der wichtigsten Voraussetzungen zum vollständigen Rückbau der ehemaligen deutschen Pilot-Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) ist die Verglasung der in abgeschirmten Edelstahl tanks gelagerten ca. 60 m³ hochradioaktiven Abfalllösung (HAWC) mit einem Radioaktivitätsinventar von $7,7 \cdot 10^{17}$ Bq. Wie bei der Wiederaufarbeitung handelt es sich bei der Verglasung um einen unter hohem Radioaktivitätsinventar ablaufenden chemischen Prozess, der durch die Glaser-schmelzung zusätzlich noch unter Hochtemperaturbedingungen bei 1150–1200 °C stattfindet. Die Verglasung solcher Abfalllösungen stellt damit in mehrfacher Hinsicht eine Herausforderung dar. Dies betrifft die Prozesstechnologie, die Fernbedienbarkeit der Hauptprozessanlagen, die Sicherheitsauslegung gegen interne und externe Ereignisse sowie das Projektmanagement zum Bau und Betrieb einer solchen Anlage und die Erlangung der behördlichen Genehmigungen für die Anlage und das Glasprodukt. Das Verglasungsprojekt VEK wurde im Herbst 1996 begonnen, nachdem einer vor Ort-Anlage der Vorzug vor einem Transport der Abfalllösungen zur PAMELA-Anlage nach Mol/Belgien gegeben wurde. Dies nicht zuletzt deshalb, weil bei den tragenden Säulen des Projektes – Projektmanagement und Technologie – auf WAK- und eigene Ressourcen des Forschungszentrums Karlsruhe zurückgegriffen werden konnte. Die nuklearen Betriebs- und Stilllegungserfahrungen der WAK und die Entwicklungen des Instituts für Nukleare Ent-

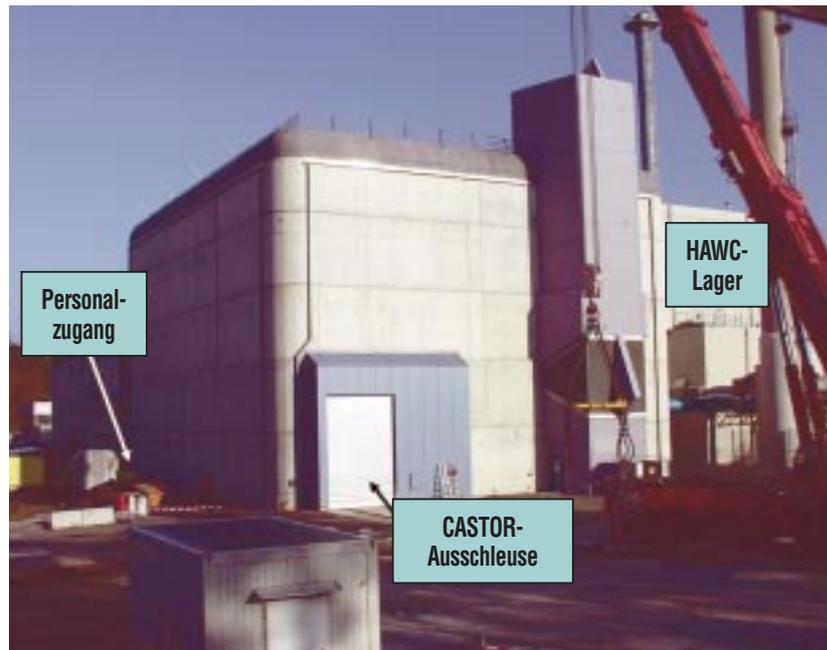


Abb. 1: Außenansicht des Prozessgebäudes VEK.

sorgung (INE) zur Verglasungstechnologie sind in den Projektbereich VEK zusammengeführt. Sie haben mit die Voraussetzungen für die Planung sowie den Bau und Betrieb der Anlage geschaffen. Abb. 1 zeigt eine Außenansicht der fertig gestellten VEK. Auch nach der Ende 2005 erfolgten Neustrukturierung des Rückbauprojektes WAK mit Einbeziehung der VEK wird diese Kooperation für die Inbetriebsetzung und den Betrieb der VEK beibehalten.

Prozesstechnologie der VEK

Die von VEK zu verglasende Abfalllösung enthält nahezu 50 verschiedene chemische Elemente, die in ein Alkaliborosilikatglas aufgenommen werden müssen. Abb. 2 zeigt die wichtigsten davon. Neben den eigentlichen Abfallelementen (Spaltprodukten, Aktinoiden) weist die Abfalllösung Korro-

sionsprodukte (Fe, Cr) und Prozesschemikalien (Na) auf. Eine besondere Rolle spielen die drei Edelmetalle Ruthenium, Rhodium und Palladium, auf die noch weiter unten eingegangen wird. Die Alkaliborosilikatgläser sind im Gegensatz zu Gläsern in der konventionellen Glasindustrie bereits bei relativ niedrigen Temperaturen von 1150–1200 °C schmelzflüssig. Die niedrigere Betriebstemperatur vermindert die Korrosionsbelastung der Keramikwände und die Verluste bei flüchtigen chemischen Elementen (Technetium) bzw. chemischen Verbindungen. Der Verglasungsprozess besteht aus den Prozessschritten Eindampfung der Abfalllösung bei ca. 120 °C, Umwandlung des salzartigen Trockenrückstandes in Oxide durch thermische Zersetzung bei ca. 300–800 °C und Glaser-schmelzung bei 1150–1200 °C durch glaschemische Reaktionen der Ab-

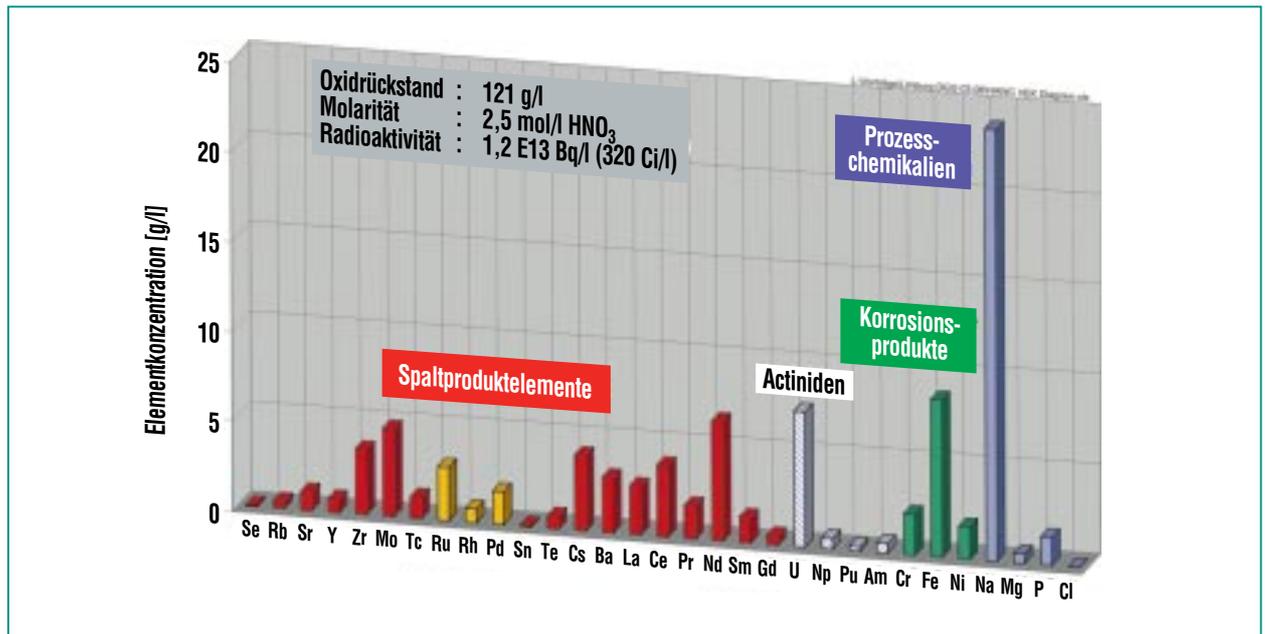


Abb. 2: Konzentration der wichtigsten Elemente der Abfalllösung, die in der VEK verglast wird.

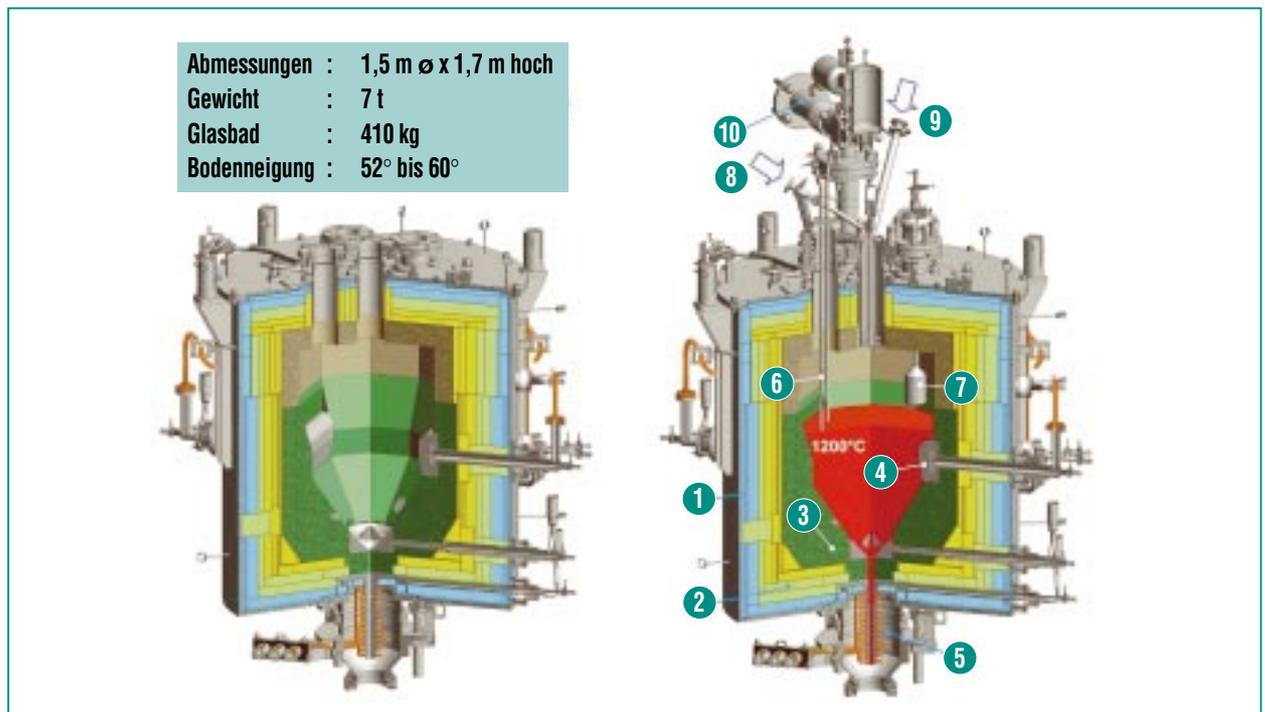


Abb. 3: Schema des Glasschmelzofens der VEK. Linkes Bild: leerer Schmelzofen mit gegenüberliegenden luftgekühlten Plattenelektroden und Bodenelektrode mit Durchlass von Glasschmelze in das Bodenauslaufsystem. Rechtes Bild: Aufbau des Schmelzofens (1) Edelstahlgehäuse (2) thermische Isolierung (3) Schmelzbadkeramik (4) Schmelzbadelektrode (5) Bodenauslaufsystem (6) Temperaturmessstellen (7) Füllstandsmessstelle (8) Zulauf Abfalllösung (9) Zulauf Glasfrittenperlen (10) Abgasrohr zur Abgasreinigungsstrecke.

falloxide mit zugegebenen glasbildenden Stoffen.

Im Glasschmelzofen der VEK laufen diese Prozessschritte kontinuierlich und simultan auf der Oberfläche des Glasschmelzbades ab. Die Abfalllösung wird ohne Vorbehandlung aus einem Dosierbehälter mittels eines Airlifts in den Schmelzofen eingespeist. Die Glasfrittenzugabe erfolgt chargenweise und mengenmäßig gekoppelt an die Einspeisung der Abfalllösung. Das Schema des VEK-Glasschmelzofens zeigt Abb. 3.

Im linken Bild ist der leere Schmelzofen gezeigt mit den in gegenüberliegenden Wänden installierten dickwandigen und luftgekühlten Elektroden aus INCONEL 690® (Cr-Ni-Legierung) zur Beheizung des Glasschmelzbades, wobei Wechselstrom von ca. 450 A bei el. Spannungen von 80–100 V verwendet wird. Der Schmelzofenboden ist geneigt, um sedimentierende Edelmetallpartikel (Ruthenium, Rhodium und Palladium), die in der Glasschmelze nicht löslich sind, nicht akkumulieren zu lassen, sondern dem Bodenauslaufsystem zuzuleiten. Bei einer Akkumulation bildet sich hochviskoser und elektrisch gut leitender Edelmetallschlamm, der sich auf Glasabfüllung und Beheizung negativ auswirken kann. Zur Glasabfüllung wird das dickwandige INCONEL 690® Glasauslaufrohr des Bodenauslaufsystems induktiv beheizt. Zur Prozesskontrolle befinden sich im oberen Bereich des Glasbades, im Oberofenraum, in den Elektroden und in den Wänden des Schmelzofens insgesamt 25 Temperaturmessstellen.

Die Hauptprozessanlagen der VEK – zur chargenweise Übernahme der Abfalllösung aus den Lagerbehältern, Glaserschmelzung, Glas-kokillenbehandlung, Abgasreinigung – wurden wegen des hohen Strahlenpegels in abgeschirmten heißen Zellen installiert. Die wichtigste heiße Zelle ist die Schmelzofenzelle, in der der Dosierbehälter für die Zugabe der Abfalllösung in den Schmelzofen sowie der Nassetstauber und Kondensator als die ersten beiden Komponenten der Abgasreinigungsstrecke installiert sind. Abb. 4 zeigt die Einbringung des Schmelzofens in die Schmelzofenzelle der VEK. Abb. 5 enthält ein Blockschaltbild der VEK zur Übersicht über die wichtigsten Anlagenbereiche. Die Abfalllösung wird in Chargen von ca. 1,6 m³ in die Übernahmebehälter der VEK übernommen und von dort in Chargen von ca. 25 dm³ in den Dosierbehälter der Schmelzofenzelle transferiert. Die



Abb. 4: Einbringung des Schmelzofens in die Schmelzofenzelle der VEK.

Einspeisung vom Dosierbehälter in den Schmelzofen erfolgt kontinuierlich. Die Glasfrittenzugabe geschieht über ein Schleusensystem mit Wiegeeinrichtung für die Einzelchargen. Die Reinigung des

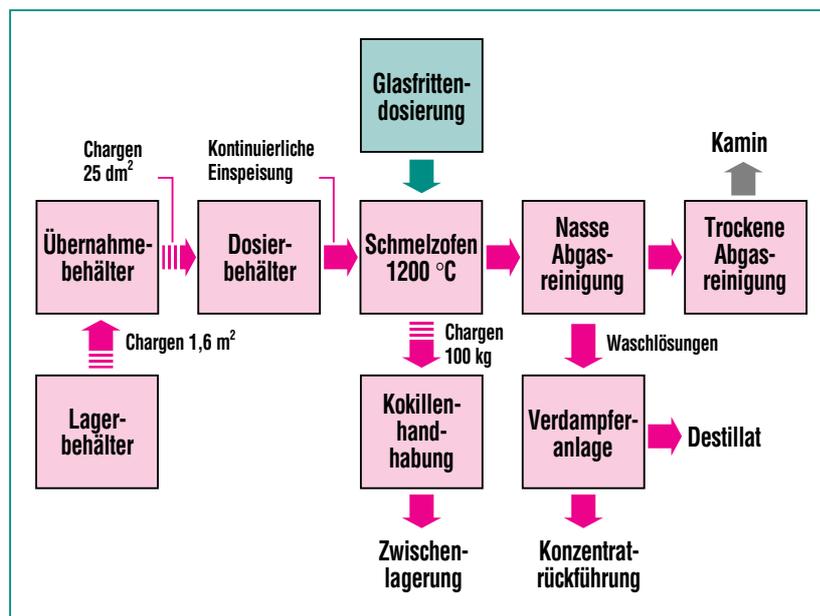


Abb. 5: Vereinfachtes Blockdiagramm der VEK mit den wichtigsten prozesstechnischen Funktionseinheiten.

Schmelzofenabgases erfolgt zuerst nass (Nassentstauber, Kondensator, Strahlwäscher, NO_x-Kolonnen) mit anschließender Trockenfiltration (Fasermattenfilter, HEPA-Filter 1, Jod-Filter, HEPA Filter 2), bevor das Abgas über ein Rootsgebläse und Kamin an die Umgebung abgegeben wird.

Glasprodukt

Die Entwicklung und Charakterisierung des VEK-Glasproduktes wurde in den neunziger Jahren innerhalb eines Technologieprogramms im Labor durchgeführt. Die Ergebnisse konnten an technisch hergestelltem inaktivem Glas bestätigt werden. Für das Qualifikationsverfahren des Glasproduktes einschließlich des Glasgebundes (Glasprodukt, Kokille, geschweißter Deckel, Dekontamination) ist das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) in Salzgitter zuständig. In Abb. 6 sind die für die VEK-Glasgebünde gültigen Nominalwerte angegeben.

Die Qualitätskriterien des Glasproduktes umfassen insbesondere

die hydrolytische Stabilität des Glases bei Korrosionsangriff durch wässrige Systeme, die weitestgehende Kristallisationsfreiheit sowie die Homogenität. Für das Glasgebünde sind zusätzliche Qualitätsparameter und Kenngrößen vorgegeben, die insgesamt die Zwischen- bzw. Endlagerfähigkeit der Glasgebünde absichern (z. B. Abfalloxidbelastung, Leerkokille, Stapelbarkeit).

Gegenwärtiger Status und Ausblick

Die 1. Teilbetriebsgenehmigung (TBG) der VEK wird durch einen Kalttestbetrieb in der zweiten Hälfte 2006 abgeschlossen. Dabei wird HAWC-Simulat mit einer chemischen Zusammensetzung ähnlich der des HAWC verglast. Lediglich die Edelmetalle Ru, Rh und Pd, die Aktinoidenelemente und das nur radioaktiv vorkommende Technetium sind durch andere Elemente ersetzt, wie z. B. die Aktinoide durch Lanthan. Im Kalttestbetrieb werden 15 m³ HAWC-Simulat verglast und ca. 27 Glaskokillen pro-

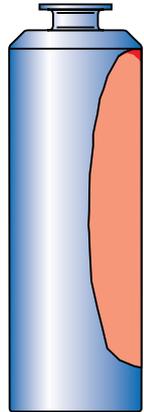
duziert. Beim Neundurchsatz der Anlage von 10 dm³/h entsprechend 7 kg/h Glasproduktion dauert der Kalttestbetrieb ca. 2,5 Monate einschließlich An- und Abfahren der Anlage. Im Kalttestbetrieb wird u. a. die Prozesssteuerung und Prozessführung des Verglasungsprozesses zur Herstellung spezifikationsgerechter Glasgebünde demonstriert und dies unter weitestgehenden Bedingungen des späteren aktiven Betriebs. Ebenso werden die für alle Einzelsysteme der VEK vorliegenden und vom Gutachter geprüften Bedienungsanweisungen getestet und danach gegebenenfalls einer Revision unterzogen oder endgültig für die 2. TBG übernommen.

Die heiße Inbetriebsetzung wird nach Auswertung des Kalttestbetriebs im Rahmen der 2. TBG erfolgen [1]. Hierzu werden zu 2 m³ Abfallsimulat im Übernahmebehälter der VEK eine relativ geringe Menge an radioaktiver Abfalllösung zugesetzt und die Mischung verglast. Nach erfolgreicher heißer Inbetriebnahme werden der heiße Produktionsbetrieb der VEK aufgenommen und ca. 130 Glaskokillen hergestellt, die zum Abtransport in 5 CASTOR-Behältern bereitgestellt werden. Die Verglasung der hochradioaktiven Abfalllösung der WAK wird zweifellos einen der Meilensteine des Rückbauprojektes WAK darstellen.

Literatur

- [1] J. Fleisch, M. Weishaupt, G. Roth, S. Weisenburger, „HAWC-Entsorgung der WAK – eine mit der VEK zu lösende Aufgabe“, *Nachrichten des Forschungszentrums Karlsruhe* 3/2006, im Druck

Parameter	Werte
Glasbelastung (Abfalloxide)	16 Gew. %
Glasmasse	400 kg
Gebindemasse	495 kg
Gesamt- α -Aktivität	5,6 E13 Bq
Gesamt- β/γ -Aktivität	6 E15 Bq
Gesamtmasse Uran	3,98 kg
Gesamtmasse Pu	0,132 kg
Zerfallswärme	526 W
Nicht festhaftende α -Strahler	0,4 Bq/cm ³
Oberflächenkontamination β -Strahler	4,0 Bq/cm ³
Dosisleistung β/γ an Oberfläche	440 Gy/h



⊥ ∅ 430 mm ⊥

Abb. 6: Nominalwerte der VEK-Glaskokillen.

Partitioning und Transmutation

C. Fazio, J. U. Knebel, W. Tromm, Programm Nukleare Sicherheitsforschung;
A. Geist, K. Gompfer, INE

Einleitung

Aus Kernkraftwerken werden weltweit pro Jahr ca. 10.000 Tonnen abgebrannte Kernbrennstoffe entladen, die sicher entsorgt werden müssen. Vor dem Hintergrund der langen Halbwertszeiten einiger Radionuklide muss über sehr lange Zeiträume sichergestellt sein, dass keine Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus einem Endlager erfolgt. International werden deshalb Alternativen zur Endlagerung langlebiger Radionuklide untersucht. Dabei sollen diese Radionuklide durch geeignete Prozesse aus dem abgebrannten Kernbrennstoff abgetrennt (P, Partitioning) und dann in speziellen Anlagen durch Neutronenreaktionen in stabile oder kurzlebige Isotope umgewandelt (T, Transmutation) werden. Die Radiotoxizität der verbleibenden endgelagerten Abfälle wäre nach einigen hundert Jahren auf das Niveau des natürlichen Urans abgeklungen, was das Langzeitgefährdungspotenzial minimieren würde. Die FuE-Arbeiten zu Partitioning und Transmutation konzentrieren sich im Forschungszentrum auf Plutonium (Pu) und die sogenannten minoren Actiniden Neptunium (Np), Americium (Am) und Curium (Cm), da diese über sehr lange Zeiträume die Radiotoxizität in den abgebrannten Kernbrennstoffen bestimmen.

Partitioning

Partitioning kann hydrometallurgisch, also aus wässrigen Lösungen, oder pyrometallurgisch aus Salzschnmelzen erfolgen. Die pyrometallurgischen Verfahren haben noch nicht das Entwicklungsstadium der hydrometallurgischen

Verfahren erreicht, die zum Teil schon seit mehreren Jahrzehnten angewandt werden, z. B. im PUREX-Prozess zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen.

Am Institut für Nukleare Entsorgung (INE) wird im Rahmen europäischer Forschungsprogramme die Abtrennung von Am und Cm durch Flüssig-Flüssig-Extraktion untersucht [1]. Die Arbeiten beziehen sich auf deren Koextraktion mit den Lanthaniden aus dem Raffinat des PUREX-Prozesses, sowie auf die anschließende Trennung von Am und Cm von den Lanthaniden im SANEX-Prozess (Selective Actinide EXtraction). Diese Trennung ist unumgänglich, weil die Lanthaniden im Überschuss vorliegen und zum Teil hohe Neutroneneinfangquerschnitte haben, was eine effektive Transmutation erschweren würde. Die Trennung stellt wegen der großen chemischen Ähnlichkeiten von Am und Cm und den Lanthaniden eine Herausforderung dar. Am INE wurde dazu ein hochwirksames Extraktionsmittel, das 2,6-Di(5,6-dipropyl-1,2,4-triazin-3-yl)pyridin (BTP) entwickelt (Abb. 1a) [2], das international große Beachtung fand. Es extrahiert Am und Cm hochselektiv aus 0,5–2 M Salpetersäure.

Der Grund für die hohe Selektivität von BTP ist noch nicht vollständig geklärt. Es wird angenommen, dass die Bindungen der Stickstoff-Donoratome (blau gezeichnet in Abb. 1a) des BTP zu Am bzw. Cm einen höheren kovalenten Anteil besitzen als die entsprechenden Bindungen zu den Lanthaniden. Dies könnte sich in Unterschieden der Bindungslängen zeigen. Zur Aufklärung dieser Fra-

ge wurden Am, Cm und das Lanthanid Europium mit BTP extrahiert und die Strukturen der gebildeten Komplexe in organischer Lösung mit EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) identifiziert. Für alle $M(\text{BTP})_3$ -Komplexe (Abb. 1b) wurden aber identische Strukturen und Bindungslängen gefunden [3, 4, 5]; die Selektivität von BTP ist also nicht in strukturellen Unterschieden begründet. Eine ergänzende Untersuchung mittels TRLFS (Time-Resolved Laser-induced Fluorescence Spectroscopy) zeigte aber, dass der $\text{Cm}(\text{BTP})_3$ -Komplex bereits bei wesentlich niedrigerem BTP-zu-Metallionen-Konzentrationsverhältnis

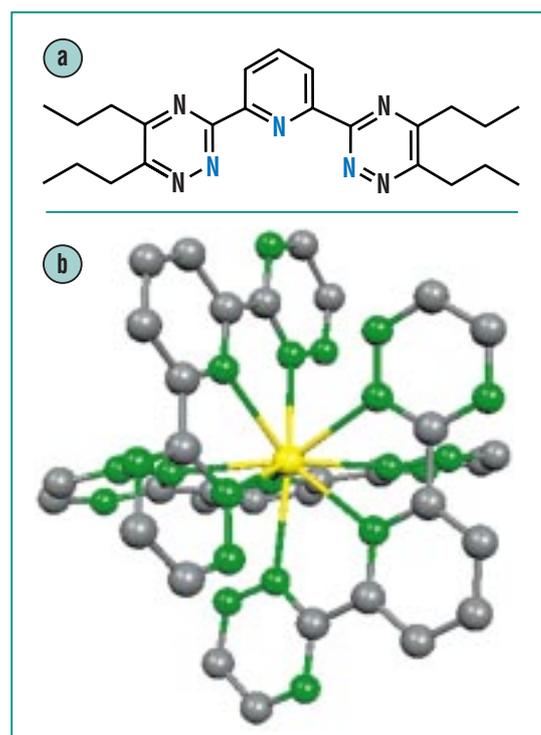


Abb. 1: a) 2,6-Di(5,6-dipropyl-1,2,4-triazin-3-yl)pyridin (BTP)

b) Berechnete räumliche Struktur der $M(\text{BTP})_3$ -Komplexe. Gelb = Metallion M (Americium, Curium oder Europium); grün = Stickstoff; grau = Kohlenstoff. Wasserstoff-Atome und Alkyl-Reste sind nicht gezeigt.

gebildet wird als der entsprechende Europium-Komplex [3, 5]. Dies deutet darauf hin, dass die größere Affinität von BTP zu den dreiwertigen Actiniden als Grund für die hohe Selektivität angesehen werden kann.

Zur Untersuchung und Erprobung kontinuierlicher Extraktionsprozesse wurden am INE sogenannte Miniatur-Hohlfasermodule (HFM), bestehend aus rund 100 mikroporösen Hohlfasern, entwickelt [6]. Sie besitzen durch die dichte Packung der Fasern eine große Austauschfläche. Aus mehreren gekoppelten Miniatur-HFM wurde eine HFM-Microplant entwickelt und aufgebaut, die kontinuierliche Trennprozesse mit lediglich ca. 30 mL Feedphasen ermöglicht [7]. Mit dieser Apparatur konnten aus simuliertem PUREX-Raffinat über 99,9 % Am und Cm abgetrennt werden. In einem SANEX-Test mit BTP als Extraktionsmittel wurde Am zu über 99,9 % abgetrennt, während lediglich ca. 1 % der Lanthaniden mit extrahiert wurde [6].

Eine für den Einsatz in Heißen Zellen weiterentwickelte Version der HFM-Microplant wurde angefertigt (Abb. 2), und in enger Zusammenarbeit mit dem Europäischen Institut für Transurane (ITU) getestet. Mit ihr sollen Extraktionsversuche mit echtem hochradioaktivem PUREX-Raffinat in den Heißen Zellen des ITU durchgeführt werden.

Transmutation

Für die Transmutation werden weltweit spezielle beschleunigergetriebene, unterkritische Anlagen untersucht. Im April 2005 startete dazu das EU-Projekt EUROTRANS (EUROPäisches Forschungsprogramm für die TRANsmutation hoch radioaktiver Abfälle in beschleunigergetriebenen Systemen (ADS)) unter der Koordination des Forschungszentrums Karlsruhe [8]. Insgesamt sind daran 42 Partner aus Forschung, Industrie und Lehre aus 14 europäischen Ländern beteiligt. Prinzipielle Zielsetzung ist die Machbarkeit der Transmu-

tation der langlebigen Radionuklide in kurzlebige Radioisotope oder stabile Elemente zu demonstrieren. In diesem Projekt wird eine unterkritische beschleunigergetriebene Anordnung (Accelerator Driven System, ADS) untersucht, die durch die Kopplung eines Protonenbeschleunigers mit einem unterkritischen Kern herausragende, inhärente Sicherheitseigenschaften aufweist. Thermohydraulische und materialspezifische Untersuchungen in großskaligen Versuchsanlagen dienen dazu, die notwendigen Technologien und Werkstoffe zu entwickeln. Parallel dazu wird das große Sicherheitspotenzial dieser Systeme geprüft und bewertet. Sämtliche Arbeiten sind in Szenariostudien einbezogen, die die Untersuchung und Bewertung eines geschlossenen Brennstoffkreislaufs zum Ziel haben.

Als strategisches Forschungsziel auf diesem Gebiet sollen Schritte für Schritt Vorarbeiten für ein europäisches Transmutations-Demonstrationsprojekt (ETD) von rund 50 bis 100 MWth erfolgen, mit der die technische Machbarkeit der Transmutation in einem beschleunigergetriebenen System (XT-ADS) nachgewiesen werden soll. Zusätzlich soll ein allgemeines Auslegungskonzept (einige hundert MWth) einer modularen europäischen Anlage für die industrielle Transmutation (EFIT) als langfristige Lösung entstehen. Beide Konstruktionen weisen dieselben grundlegenden Systemmerkmale auf, damit XT-ADS und EFIT gegenseitig skalierbar sind. Abb. 3 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer ADS-gestützten Transmutationsanlage.

EUROTRANS umfasst eine kritische Masse an Ressourcen und

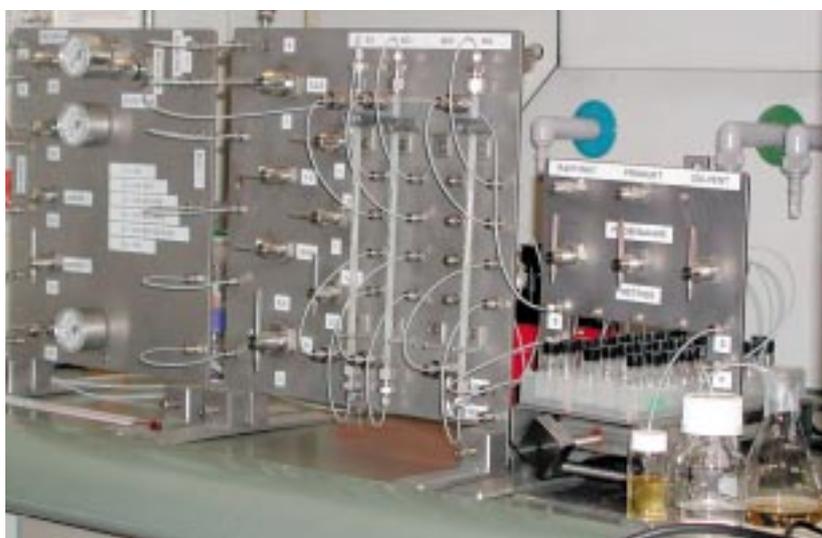


Abb. 2: Die für den Einsatz in einer Heißen Zelle entwickelte HFM-Microplant.

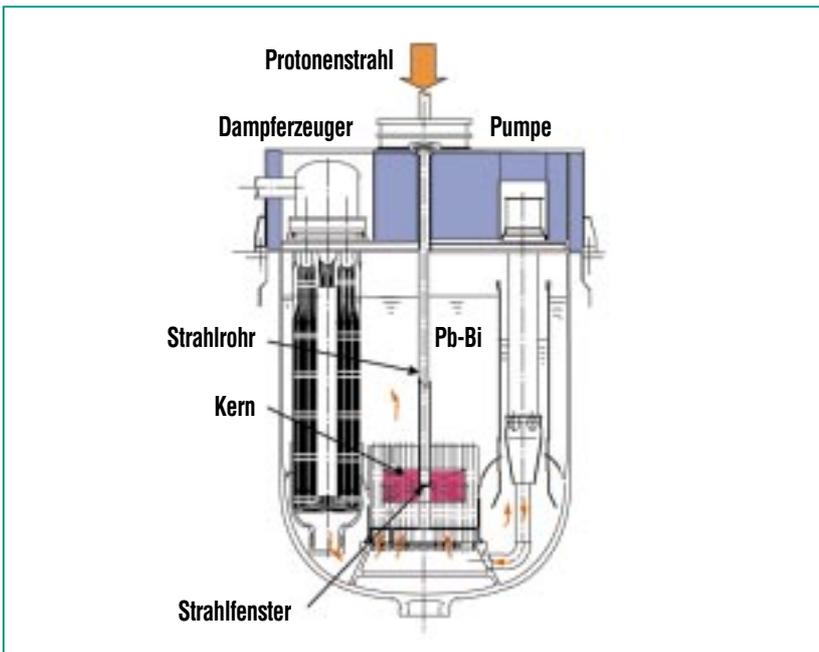


Abb. 3: Schematische Darstellung eines ADS.

Aktivitäten aus Industrie, nationalen Forschungszentren (einschließlich der Gemeinsamen Forschungsstelle) und Hochschulen in Europa. Ein wichtiges Ziel dieses Vorhabens ist auch die Ausbildung und Weiterbildung von Nachwuchswissenschaftlern in der Kerntechnik. Die Projektarbeit ist in einen Leitungsbereich und fünf technische Bereiche, sogenannte Domains gegliedert, an denen das Forschungszentrum maßgeblich mitwirkt:

- **DM0 Leitung:** Organisatorische, finanzielle und wissenschaftliche Leitung des Projekts durch das Forschungszentrum Karlsruhe.
- **DM1 DESIGN:** Ausarbeitung der Detailkonstruktion eines von einem Protonenlinearbeschleuniger getriebenen, fensterlosen unterkritischen Systems, XT-ADS, von 50–100 MWth und Konzeptentwurf von

ADS-Industrieanlagen einiger hundert MWth für die Transmutation (EFIT).

- **DM2 ECATS:** Zur Unterstützung der Konstruktion von XT-ADS und EFIT werden validierte Versuchsergebnisse aus einschlägigen Experimenten mit ausreichender Leistung (20–100 kW) über die Kopplung eines



Abb. 4: THEADES-Teststrecke des KALLA-Labors zur Untersuchung thermo-hydraulischer Fragestellungen in Blei-Wismuth.

Beschleunigers, eines Spallationstargets und eines unterkritischen Blankets zur Verfügung gestellt.

- **DM3 AFTRA:** Entwicklung von uranfreien Oxidbrennstoffen, wie z. B. $(\text{Pu}, \text{MA}, \text{Zr})\text{O}_2$ oder CERCER $(\text{Pu}, \text{MA})\text{O}_2 + \text{MgO}$ oder CERMET $(\text{Pu}, \text{MA})\text{O}_2 + \text{Mo}$, zur Erprobung in Form von einzelnen Spezialbrennstäben im XT-ADS sowie als mögliche Brennstoffe für eine volle Kernladung in EFIT [9].
- **DM4 DEMETRA:** Entwicklung und Beurteilung von Strukturmaterialien und flüssigem Schwermetall (HLM) in Form von Blei- und Blei-Wismut-Technologien für Transmutationssysteme, in denen das HLM sowohl als Spallationsmaterial wie auch als Kernkühlmittel dient. Hier steht dem Forschungszentrum mit dem KALLA-Labor ein in Europa einzigartiges Labor zur Verfügung (Abb. 4) [10, 11]
- **DM5 NUDATRA:** Verbesserung von Kerndatensammlungen, Prüfung von Kernmodellen mit

Hilfe von Sensitivitätsanalysen und einer Validierung der Simulationswerkzeuge.

Das strategische Ergebnis dieses Vorhabens dürfte eine zuverlässi-

ge, dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende Grundlage darstellen, auf der die technische Machbarkeit der Transmutation durch ADS beurteilt und eine erste Kostenschätzung für ein

ADS-gestütztes Transmutations-system abgegeben werden kann [12].

Literatur

- [1] A. Geist, K. Gompper, M. Weigl, T. Fanghänel, *Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe 2004*, 36 (2), 97–102
- [2] Z. Kolarik, U. Müllich, F. Gassner, *Solvent Extr. Ion Exch.* 1999, 17 (5), 1155–1170
- [3] M.A. Denecke, A. Rossberg, P.J. Panak, M. Weigl, B. Schimmelpfennig, A. Geist, *Inorg. Chem.* 2005, 44 (23), 8418–8425.
- [4] M.A. Denecke, A. Geist, M. Weigl, P.J. Panak, B. Schimmelpfennig, *ANKA Annual Report 2005*, S. 86–87. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
- [5] A. Geist, M.A. Denecke, P.J. Panak, M. Weigl, B. Schimmelpfennig, K. Gompper, *Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe 2005*, 37 (4), 191–196
- [6] A. Geist, M. Weigl, K. Gompper, *Radiochim. Acta* 2005, 93, 197–202
- [7] A. Geist, M. Weigl, K. Gompper, *Proc. Internat. Solvent Extraction Conf. (ISEC 2005), Beijing, China, September 19–23, 2005*, p. 659–664.
- [8] J. Knebel, *European Research Programme for the Transmutation of high Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System, Euratom Research Projects and Training Activities, Volume II, EUR 21229*, 2006
- [9] X.-N. Chen, T. Suzuki, A. Rineiski, M. Mori, C. Matherath Boccaccini, W. Maschek, K. Morita, Analysis of Transients and Severe Accidents in Accelerator Driven Transmuters (ADTs) of the 800 MWth Class with Fertile-Free Fuels (470kB), Proceedings of GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, Oct 9–13, 2005, Paper No. 152
- [10] R. Stieglitz, C. Fazio, J. Knebel, G. Müller, J. Konys, *Heavy-Liquid Metal Technologies Development in KALLA, 2006 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP '06), Reno, Nev., June 4–8, 2006*
- [11] A. Weisenburger, G. Müller, A. Heinzl, V. Engelko, A. Rousanov, „Corrosion of modified FeCrAlY Coated Cladding Tubes in Liquid PbBi“, *Proceedings of the European Corrosion Congress EUROCORR 2005, Lisbon (2005)*, 553
- [12] J. Knebel et al, *EUROTRANS, European Research Programme for the Transmutation of High Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System, FISA 2006, EU Research and Training in Reactor Systems, March 2006*

Sicherheitsforschung zur Endlagerung

K. Gompper, R. Klenze, H. Geckeis, B. Kienzler, T. Fanghänel, INE

Einleitung

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle soll in Deutschland in tiefen geologischen Formationen erfolgen, um sicherzustellen, dass diese Abfälle auch zukünftig zu keiner unzulässigen Belastung der Biosphäre führen. Die Verantwortung für die sichere Endlagerung liegt dabei bei der Bundesregierung. Die FuE-Arbeiten zur Langzeitsicherheit der Endlagerung, die im Institut für Nukleare Entsorgung (INE) durchgeführt werden, sind gesellschaftliche Vorsorgeforschung und langfristig angelegt.

Die technischen Fragen für den Bau und Betrieb eines Endlagers

sind heute weitgehend geklärt. Die Langzeitsicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle ist jedoch durch technische Systeme allein nicht nachweisbar. Vielmehr muss das Verhalten langlebiger Radionuklide unter den geochemischen Bedingungen eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen verstanden werden, um Werkzeuge und Daten für eine belastbare Langzeitsicherheitsanalyse bereitzustellen.

Da in Deutschland noch keine Entscheidung über den Standort eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle getroffen wurde, sind alle derzeit international diskutierten Wirtsgesteinsformationen (Salz, Hart-

gestein, Ton) in die Untersuchungen einbezogen. Die FuE-Arbeiten des INE fokussieren sich dabei auf die Actiniden und langlebigen Spaltprodukte (Abb. 1). Nach dem Abklingen des Hauptteils der Spaltprodukte (300 Jahre) bestimmen die Actiniden das Radiotoxizitätspotential der hochradioaktiven Abfälle über hunderttausende von Jahren.

Grundlegende Untersuchungen

Belastbare Voraussagen zur Radionuklidfreisetzung über große Zeiträume, wie sie für Langzeitsicherheitsanalysen gefordert werden, lassen sich nicht durch die zeitliche Extrapolation makroskopisch beobachteter Phänomene erhalten. Prognosen können nur auf Basis des Verständnisses relevanter Prozesse auf molekularem Niveau und der Anwendung der Kenntnisse auf natürliche Systeme erfolgen. Das Konzept eines geochemisch geführten Sicherheitsnachweises basiert auf der Identifizierung und Quantifizierung der für die Mobilisierung oder Immobilisierung von Radionukliden verantwortlichen Reaktionen unter den geochemischen Bedingungen des Nah- und Fernbereichs eines Endlagers. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass die Aussagen weitgehend auf fundamentalen Gesetzmäßigkeiten (Gleichgewichtsthermodynamik) basieren. Die Qualität der Aussagen hängt dabei in erster Linie vom Grad des mechanistischen Verständnisses und der Belastbarkeit und Verfügbarkeit thermodynamischer Daten ab.

So wurde beispielsweise mit der Aufklärung wesentlicher Mecha-

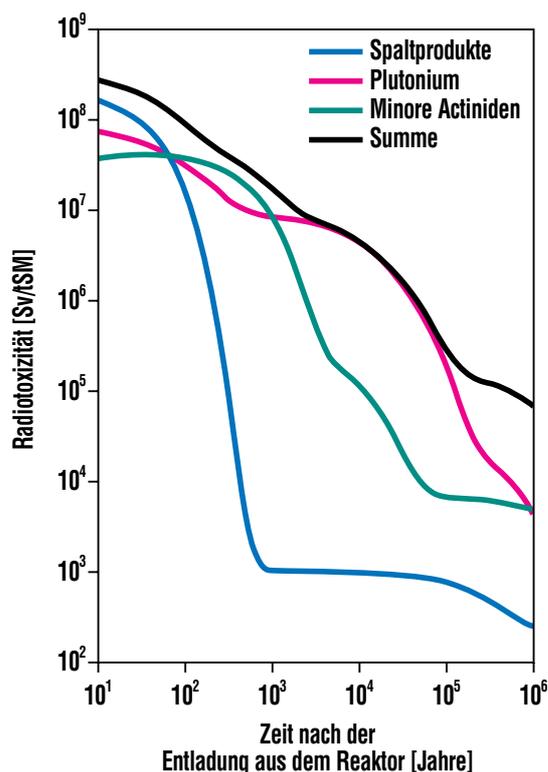


Abb. 1: Verlauf der Radiotoxizität von 1 Tonne abgebranntem Kernbrennstoff (Anreicherung: 4,2 % ²³⁵U; Abbrand: 50 GWd/t) mit der Zeit. Beiträge von Spaltprodukten, Plutonium und Minoren Actiniden.

nismen zu den Redox-, Hydrolyse- und Fest/Flüssig-Reaktionen von Plutonium (Pu) im letzten Jahr ein Durchbruch erzielt (Abb. 2). Erstmals konnte die Bildung von amorphen Oxiden/Hydroxiden der allgemeinen Form PuO_{2+x} ($x < 0.25$) in wässriger Lösung eindeutig nachgewiesen werden. Ferner wurde als wichtiger Reaktionspartner kolloidales Pu(IV)-Hydroxid identifiziert. Die ablaufenden Reaktionen der Pu-Spezies sind durchweg Gleichgewichtsreaktion und lassen sich thermodynamisch quantifizieren. Damit konnten seit Jahren offene Fragen der Pu-Chemie gelöst und der Weg für eine weitergehende Aufklärung der Redox- und Komplexbildungsreaktionen von Pu unter endlagerrelevanten Bedingungen geebnet werden.

Anwendungsorientierte Untersuchungen

Die Isolierung radioaktiver Abfälle von der Biosphäre in tiefen geologischen Formationen über Zeiträume von mehreren hunderttausend Jahren bietet ein Höchstmaß an Sicherheit. Durch ein Multibarriersystem bestehend aus technischer Barriere (Abfallprodukt, Behälter), geotechnischer Barriere (Versatzmaterial, Dammbauwerke) und geologischer Barriere (Wirtsgestein, Deckgebirge) soll die Radionuklidfreisetzung aus einem Endlager wirkungsvoll verhindert werden. Die anwendungsorientierten Untersuchungen haben zum Ziel, die Radionuklidmobilität bzw. -rückhaltung in den verschiedenen Barrieren als Funktion der geochemischen Bedingungen zu quantifizieren und durch

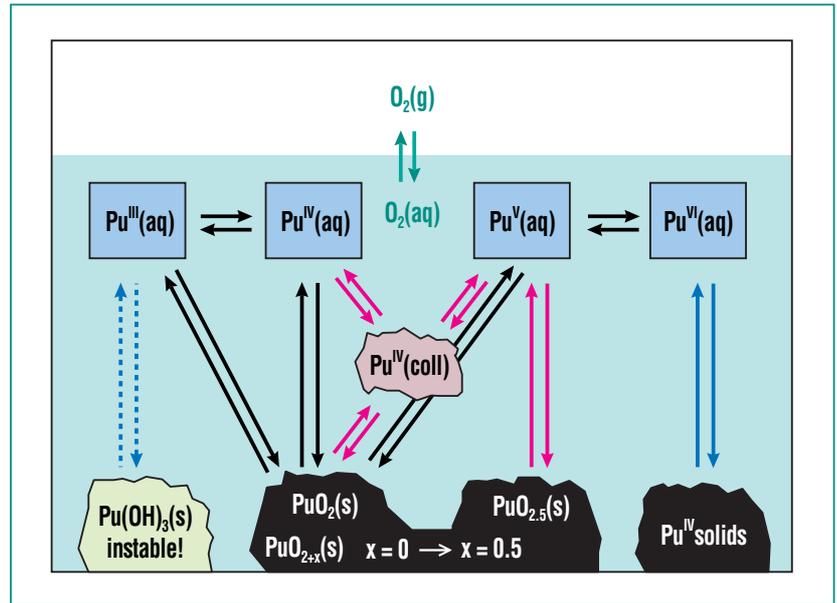


Abb. 2: Löslichkeits- und Redoxpotenzial bestimmende Gleichgewichtsreaktionen (Pfeile) der gelösten (aq), festen (s) und kolloidalen (coll) Pu-Spezies (Wertigkeitsstufen III bis VI) in saurer Lösung an Luft.

geeignete Maßnahmen zu optimieren.

Die Freisetzung von Radionukliden aus Abfällen in einem Endlager hängt entscheidend davon ab, welches geochemische Milieu sich nach einem Wasserzutritt einstellt. Das INE untersucht diese Fragestellung in einem Langzeitversuch im Forschungsbergwerk Asse, einem ehemaligen Salzbergwerk, in dem zwischen 1967 und 1978 schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert wurden. Bei den Experimenten wurden zementhaltige Abfallprodukte über viele Jahre konzentrierter Salzlauge ausgesetzt (Abb. 3a) und die Korrosion des Zementproduktes ebenso verfolgt wie die Entwicklung der Lösungszusammensetzung und die Änderung physikochemischer Eigenschaften, wie etwa pH-Wert und Redoxpotenzial. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass

sich die ablaufenden chemischen Reaktionen relativ schnell Gleichgewichtszuständen annähern (Abb. 3b), was durch Modellrechnungen bestätigt wurde. Dies eröffnet die Möglichkeit, durch thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen die Wirksamkeit der (geo-)technischen Barrieren im Nahbereich der Abfälle belastbar abzuschätzen. Auf der Basis dieses Ansatzes wurde für das Forschungsbergwerk Asse ein Verfüllkonzept erarbeitet, das Bestandteil des Langzeitsicherheitsnachweises ist.

Entwicklung und Anpassung von Speziationmethoden

Die Mobilisierung und Immobilisierung von Radionukliden im Nah- und Fernbereich eines Endlagers wird durch eine Vielzahl komplexer

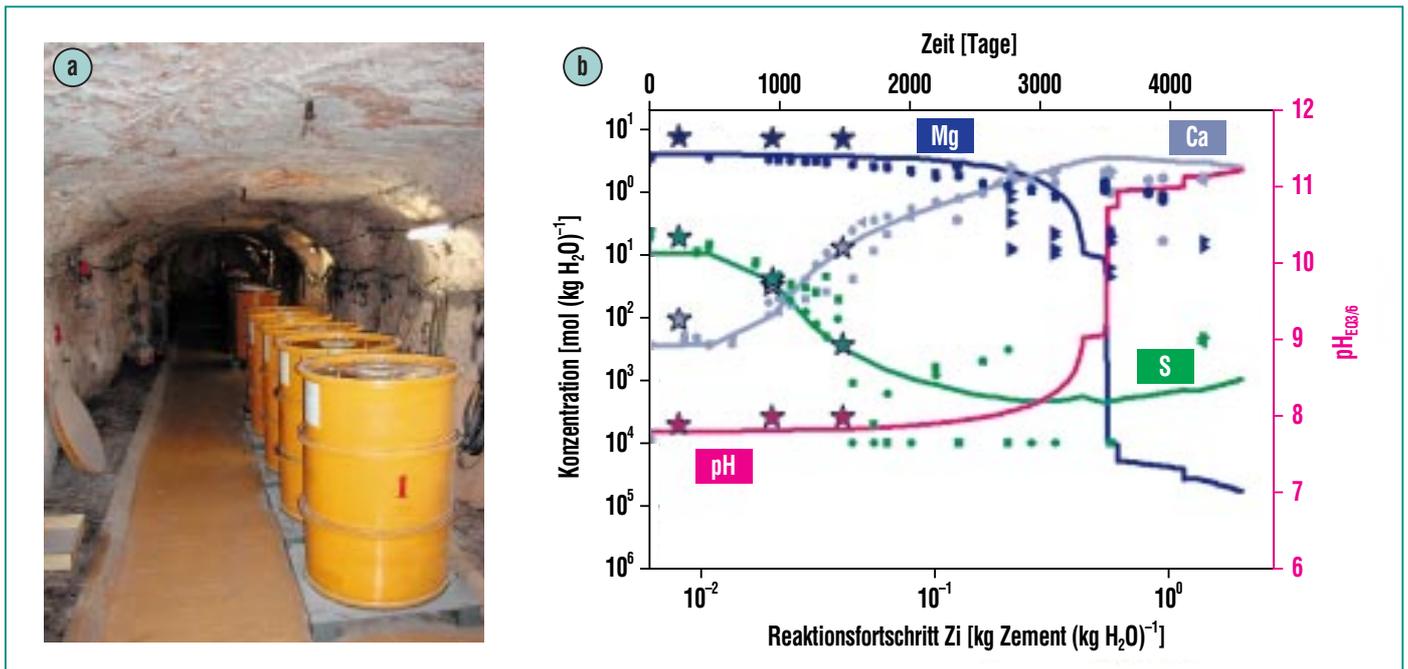


Abb. 3: Langzeit-Korrosionsexperimente mit zementierten schwach- und mittelradioaktiven Abfallsimulaten:
a) Versuchsanordnung auf der 490-Meter-Sohle im Forschungsbergwerk Asse;
b) Entwicklung der Lösungszusammensetzung bei Korrosionsexperimenten mit $MgCl_2$ -reicher Salzlösung: die Symbole kennzeichnen die gemessenen pH-Werte sowie die Lösungskonzentration an Calcium, Magnesium und Schwefel, die Linien kennzeichnen die durch geochemische Modelle vorhergesagten Veränderungen des pH-Werts sowie der Lösungskonzentrationen.

Reaktionen kontrolliert, zu denen beispielsweise Auflösung, Hydrolyse, Redox- und Komplexbildungsreaktionen, Sorption, Bildung von sekundären Phasen oder Kolloidbildung gehören. Zur Quantifizierung und Charakterisierung der Radionuklide und zur Aufklärung der Reaktionsmechanismen werden hoch sensitive und selektive Speziationmethoden eingesetzt. Die am INE verfügbaren spektroskopischen Methoden zur Actinidenspeziation stellen modernste, sich ergänzende Techniken dar, die für die Vielzahl von Problemstellungen der nuklearen Entsorgung kontinuierlich weiterentwickelt und angepasst werden. Im Jahr 2005 erfolgte die aktive Inbetriebnahme der INE-Beamline zur

Actinidenforschung an der ANKA, die international große Beachtung fand, und bereits im ersten Jahr zu einer Vielzahl an Kooperationen mit in- und ausländischen Wissenschaftlern führte. Durch die Kombination mit den experimentellen und analytischen Einrichtungen in den aktiven Laboratorien des INE wurde damit eine in Europa einmalige Einrichtung zur Actinidenforschung geschaffen (Abb. 4).

Zusammenfassung und Ausblick

Die FuE-Arbeiten im INE zur Sicherheitsforschung der Endlagerung radioaktiver Abfälle liefern Beiträge zu einem geochemisch

fundierten Langzeitsicherheitsnachweis. Sie sind so ausgerichtet, dass grundlegende Untersuchungen zur aquatischen Chemie der Actiniden und langlebigen Spaltprodukte mit anwendungsorientierten Untersuchungen an realen Systemen (z. B. in Untertage-labors) synergistisch verknüpft werden. Unverzichtbar ist dabei die konsequente Nutzung und Weiterentwicklung hochempfindlicher und selektiver Speziationsmethoden.

Der Zeithorizont für die Standortfindung, die Errichtung und den Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle reicht bis über die Mitte des Jahrhunderts hinaus. Die geochemisch orientierten grundlegenden und anwendungs-

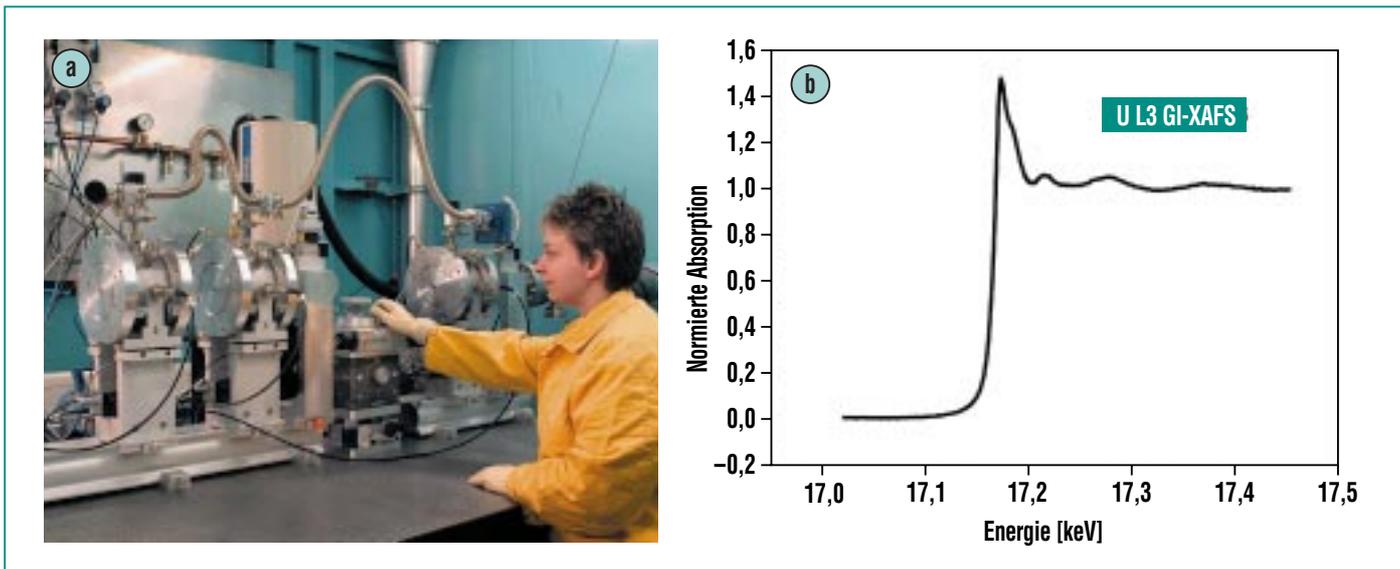


Abb. 4: INE-Beamline zur Actinidenforschung an der Synchrotronstrahlenquelle ANKA:
a) Blick in die Messhütte; b) Beispiel eines Uran-Röntgenabsorptionsspektrums in der Korrosionsschicht eines simulierten hochradioaktiven Glasproduktes. Durch die spezielle Aufnahmetechnik – streifender Einfall des Röntgenlichtes (grazing incidence x-ray absorption fine structure, GI-XAFS) wurden nur die Uranatome in der bei der Korrosion entstandenen Gelschicht detektiert.

orientierten Arbeiten des INE werden die Bewertung und Erkundung von Standorten und Wirtsformationen für ein deutsches Endlager mit hochradioaktiven Abfällen unterstützen. Nach Auswahl des Endlagerstandortes wird eine konsequente Fokussierung auf standortspezifische Untersuchungen erfolgen und die Errichtung und der

Betrieb des Endlagers werden wissenschaftlich begleitet.

Der Beibehaltung der Kompetenz und der internationalen Spitzenstellung auf dem Gebiet der geochemisch orientierten Endlagersicherheitsforschung kommt dabei entscheidende Bedeutung zu. Die Förderung des wissenschaftlichen

Nachwuchses wird eine der Zentralaufgaben sein, wobei die schon jetzt bestehende enge Einbindung des INE in Lehre und Ausbildung an den Universitäten verstärkt wird.

Neue Reaktorsysteme innerhalb der Generation IV Initiative

J. Starflinger, T. Schulenberg, IKET; J. Hofmeister, RWE Power AG;
W. Tromm, Programm Nukleare Sicherheitsforschung

Einleitung

Das Forschungs- und Entwicklungsprogramm „Generation IV“ ist eine Initiative von 10 Staaten: Argentinien, Brasilien, Kanada, Frankreich, Japan, Südkorea, Südafrika, Schweiz, das Vereinigte Königreich und die Vereinigten Staaten, die sich im Jahr 2000 auf einen Rahmen zur internationalen Zusammenarbeit in der Kerntechnik einigten. Im Juli 2003 unterschrieb die Euratom als 11. Mitglied den Vertrag zur Zusammenarbeit in dem Generation IV International Forum (GIF) [1] und ermöglichte somit allen Euratom-Mitgliedern die Mitarbeit in diesem Forum. Zur Ausarbeitung und Umsetzung der Entwicklung von Generation IV Kernenergiesystemen schlossen sich die oben genannten Länder in dem GIF zusammen. Dabei werden unter der Generation I die frühen Prototyp-Reaktoren der 50er und 60er Jahre verstanden. Generation II bilden die großen, kommerziellen Reaktoren seit den 70er Jahren, die heute noch in Betrieb sind. Generation III werden die fortschrittlichen Reaktoren genannt, die derzeit in neuen Projekten angeboten werden und z. T. bereits in Bau sind, so z. B. in Europa der EPR. Ziel der Generation IV Initiative ist, Kernenergiesysteme einer zukünftigen Generation zu entwickeln, die wettbewerbsfähige und zuverlässige Energieprodukte, also nicht ausschließlich Strom, liefern können. Sie sollen künftige Anforderungen an Sicherheit, Entsorgung, Proliferation und öffentliche Akzeptanz hinreichend erfüllen.

Generation IV umfasst das gesamte System der Kernenergie, von der

Urangewinnung bis zur Entsorgung, damit natürlich auch Kernreaktoren und den nuklearen Brennstoffkreislauf. Dabei besitzen vier politische Ziele höchste Priorität: Nachhaltigkeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit, Weiterverbreitungsbarrieren und physikalischer Schutz sowie Wirtschaftlichkeit. Nach einem umfangreichen Evaluationsverfahren wurden schließlich im Juli 2002 die folgenden 6 Kernenergiesysteme durch das GIF unter Beteiligung der Nuclear Energy Agency der OECD, der Europäischen Kommission und der IAEA ausgewählt [2]:

- Gasgekühlte Höchsttemperatur-Reaktorsysteme
- Gasgekühlte schnelle Reaktorsysteme
- Wassergekühlte Reaktorsysteme mit überkritischen Dampfzuständen
- Bleigekühlte schnelle Reaktorsysteme
- Salzschnmelze Reaktorsysteme
- Natriumgekühlte Reaktorsysteme

Am Forschungszentrum Karlsruhe werden zu diesen neuen Kernenergiesystemen vor allem konstruktive, thermohydraulische und neutronenkinetische Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Analyse und Bewertung der Sicherheitseigenschaften dieser Anlagen im Vordergrund stehen. Der größte Anteil der Arbeiten bezieht sich dabei zurzeit auf den High Performance Light Water Reactor (HPLWR), ein Leichtwasserreaktor mit überkritischen Dampfzuständen. Sämtliche Arbeiten zu

diesem Projekt sind vollständig Drittmittel finanziert über die Europäische Union und deutsche Industriepartner. Ein kurzer Auszug dieser Arbeiten wird beispielhaft im Folgenden näher erläutert.

HPLWR

Der HPLWR ist der einzige Leichtwasserreaktor (LWR), der im Rahmen des Generation IV International Forum entwickelt werden soll [2]. Sein Hauptmerkmal ist, dass der Systemdruck mit 25 MPa oberhalb des kritischen Punkts liegt. Weiterhin ist im Vergleich zu vorhandenen LWR eine Aufheizung des Kühlmittels von etwa 200 °C vorgesehen. Dabei ändert sich die Dichte des Kühlmittels über der aktiven Höhe des Kerns um etwa den Faktor 7! Die Aufheizung erfolgt einphasig, wodurch das Risiko einer Siedekrise physikalisch ausgeschlossen wird. Der überkritische „Dampf“ verlässt den Kern mit einer Temperatur von 500 °C und wird, wie bei Siedewasserreaktoren, direkt zur Turbine geleitet. Durch die hohe Austrittsenthalpie können Anlagenwirkungsgrade von über 44 % erreicht werden. Die hauptsächlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich auf den Reaktor selber. So ist beispielsweise die Machbarkeit eines Kerns zu untersuchen, geeignete Materialien für Hüllrohre und Kerneinbauten zu finden und das Sicherheitssystem auf HPLWR-Bedingungen anzupassen. Eine möglichst große Übernahme von Wissen, Methodiken und Komponenten aus der kerntechnischen Industrie und von aktuellen LWR reduziert den Forschungsaufwand auf wesentliche Gebiete.

Reaktordruckbehälter

Innerhalb des 5. EU-Rahmenprogramms [3] wurde ein HPLWR-Reaktordruckbehälter konzipiert, der in Abb. 1 dargestellt ist. Ein Teilstrom des Speisewassers wird dabei über den oberen Teil des Druckbehälters (oberes Plenum) in Wasserkästen und in den Spalt zwischen den Brennelementen geleitet (siehe Abb. 2). Der andere Teil-

strom fließt durch den Downcomer und Reflektor ins untere Plenum, wo es sich mit dem von oben kommenden Wasser aus den Spalten und den Wasserkästen vermischt. Anschließend strömt das Kühlmittel durch den Kern nach oben und erreicht seinen überhitzten Zustand schließlich im Dampfplenum, von wo aus es den Druckbehälter durch ein koaxiales Doppelrohr verlässt.

Brennelement-Konstruktion

Abb. 2 zeigt beispielhaft ein quadratisches Brennelement für den Einsatz in einem HPLWR [4]. Diese Brennelemente werden zu 9er-Bündeln zusammengefasst, um eine wirtschaftliche konstruktive Lösung zu ermöglichen, welche gleichzeitig die Verwendung herkömmlicher LWR-Steuerstab-

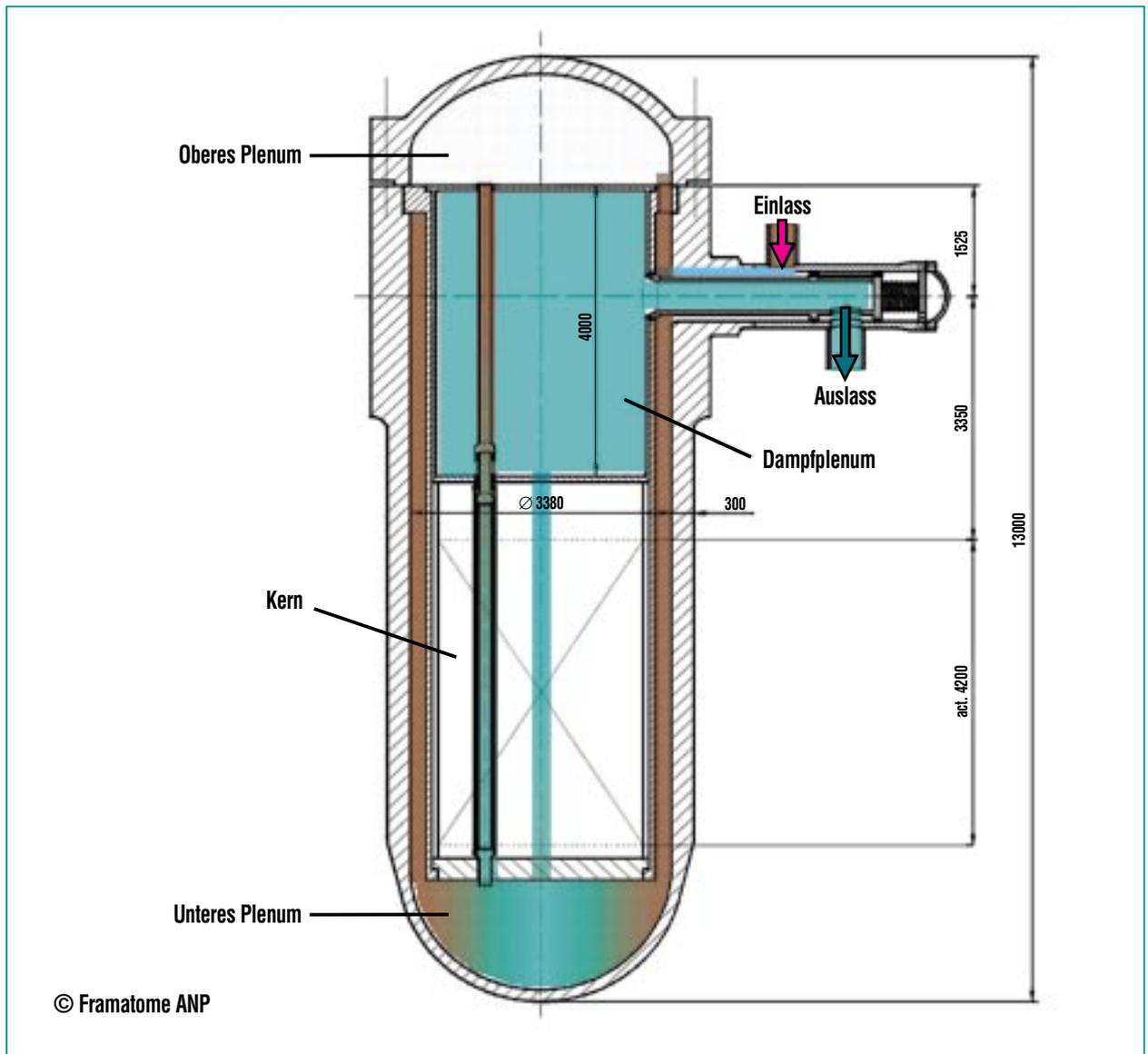


Abb. 1: HPLWR-Reaktordruckbehälter-Konzept [3].

triebe erlaubt (siehe Abb. 3). Das komplette Brennelementbündel umfasst die zuvor genannten neun Brennelemente (Abb. 2), ein Kopfstück und ein Fußstück. Das Kopfstück selber besteht aus einem Übergangselement, von quadratisch auf rund, um bessere Dichteigenschaften zu gewährleisten, einem Fensterelement, durch das der heiße Frischdampf das Brennelement verlässt, und einer Kopfstückplatte. Die in Abb. 3 im Fensterelement dargestellten grauen Leitungen sind Verlängerungen der Brennelementwasserkästen zum oberen Plenum, durch die kaltes Wasser von oben in die Brennelemente strömt. Dieser gemeinsame Konstruktionsentwurf von RWE und Forschungszentrum Karlsruhe zeigt, wie durch das nach unten fließende, kalte Wasser eine ausreichende Moderation gerade im oberen Bereich des aktiven Kerns, wo eine geringe Kühlmitteldichte vorliegt, erreicht werden kann. Eine Strömungsführung ohne un-

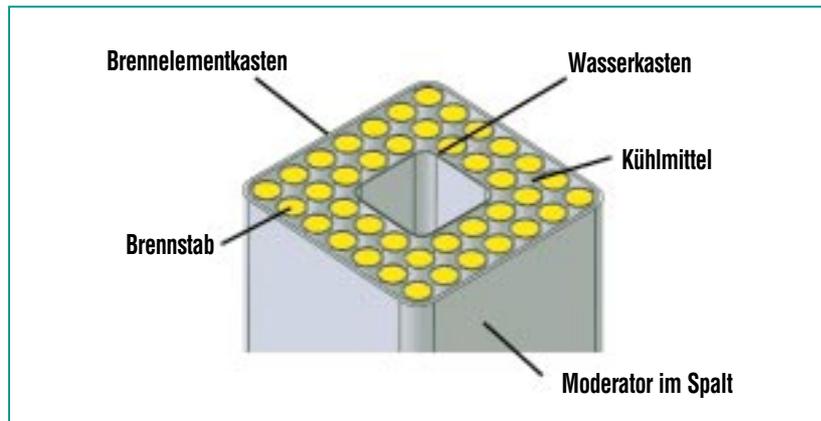


Abb. 2: Quadratisches zweireihiges Brennelement [4].

zulässige Leckagen im Kern wird mittels C-Ringen am Kopfstück realisiert. Diese Konstruktion bildet derzeit die Grundlage für weitere Kernstudien.

Beitrag zum Kompetenzerhalt

Der HPLWR eignet sich besonders gut als Thema zum Kompetenzerhalt in der Kerntechnik. Studenten und Doktoranden sind be-

sonders motiviert, einen Beitrag zur Entwicklung eines neuen Reaktors zu leisten. Sie lernen dabei Methoden und Techniken wie zum Beispiel der Umgang mit Sicherheitsanalysecodes, die einerseits auf den HPLWR und andererseits auf existierende LWR angewendet werden können. Junge Ingenieure, Physiker oder Chemiker sind mit geeigneten HPLWR-Themenstellungen bestens für eine

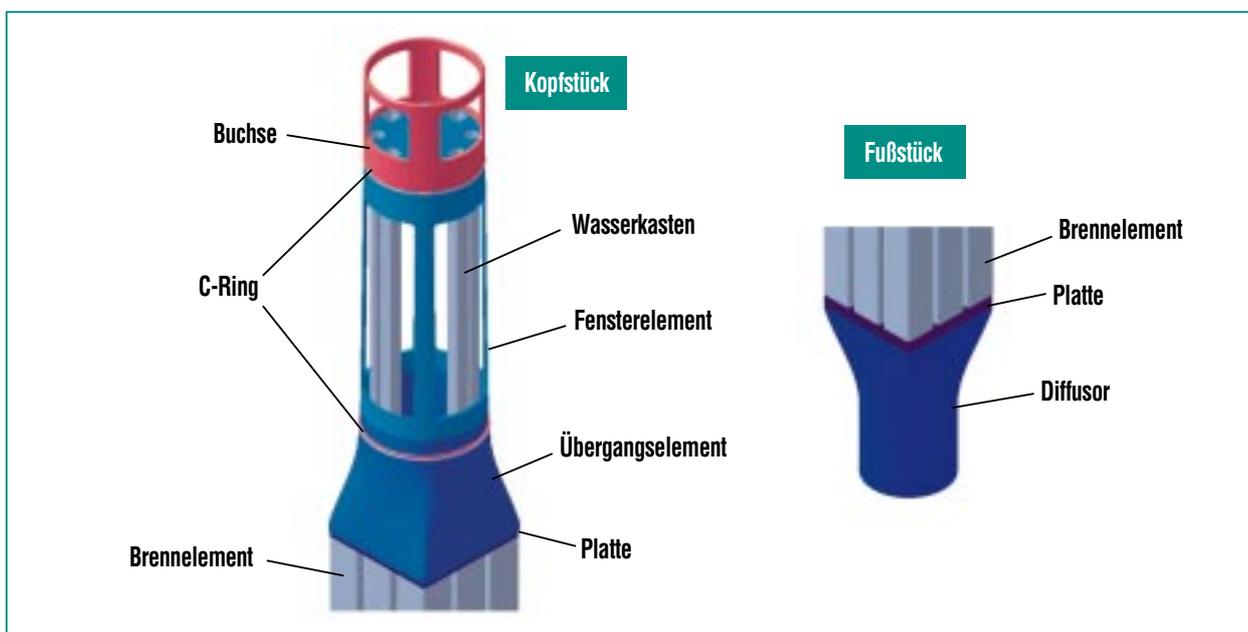


Abb. 3: Kopfstück und Fußstück des Brennelementbündels [4].

spätere Aufgabe in der kerntechnischen Industrie vorbereitet.

Europäisches Forschungsprogramm

Seit September 2006 sind die Arbeiten zum HPLWR ein Beitrag zu einem Europäischen Forschungsprojekt, HPLWR Phase 2 mit einer Laufzeit von 42 Monaten, das vom Forschungszentrum Karlsruhe koordiniert wird.

Übergeordnetes Ziel dieses Projekts ist eine Bewertung der offenen, wissenschaftlichen Fragestellungen und der technischen Machbarkeit des HPLWR im Hinblick auf künftige Einsatzmöglichkeiten. Dazu haben sich sieben Forschungszentren aus sieben europäischen Ländern, zwei Hochschulen und ein Industriepartner geeinigt, Konzepte und Vorschläge aus einem früheren Projekt zum HPLWR weiter zu vertiefen.

Ein Aus- und Weiterbildungsprogramm für Doktoranden und Studenten ergänzt das Projekt. Durch seine Nähe zur konventionellen Leichtwasserreaktor-Technologie ist dieses Projekt bestens geeignet, in Europa die Kompetenz in der Kerntechnik zu erhalten, die bei Herstellern und Betreibern zum weiteren Betrieb ihrer Kernkraftwerke benötigt wird.

Literatur

- [1] T. Schulenberg, L. Behnke, J. Hofmeister, M. Löwenberg, „Was ist Generation IV?“ FZKA 6967, Forschungszentrum Karlsruhe, 2004
- [2] U.S. DOE and Generation IV International Forum, „A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems“, GIF-002-00, Dec. 2002
- [3] D. Squarer, T. Schulenberg, D. Struwe, Y. Oka, D. Bittermann, N. Aksan, C. Maraczy, R. Kyrki-Rajamäki, A. Souyri, P. Dumaz, „High Performance Light Water Reactor“, *Nuclear Engineering and Design* 221 (2003) 167–180
- [4] J. Hofmeister, T. Schulenberg, J. Starflinger, „Auslegung eines Brennelements für einen High Performance Light Water Reactor“, *Jahrestagung Kerntechnik 2006, Aachen, 2006*

Forschung für Wasserstoffsicherheit

W. Breitung, IKET

Einleitung

Der vorliegende Beitrag beschreibt Forschungsarbeiten zur Wasserstoffsicherheit. Dieses Thema hat sich als langfristig wichtige Querschnittsaufgabe im FZK erwiesen: begonnen wurde vor 15 Jahren auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit [1], seit 10 Jahren werden zusätzlich Arbeiten zur sicheren Nutzung des zukünftigen Energieträgers Wasserstoff durchgeführt [2,3], und seit 5 Jahren sind auch Sicherheitsfragen des ITER Fusionsreaktors Gegenstand der Untersuchungen [4]. All diesen Arbeitsgebieten liegt im Störfall eine gemeinsame Ereigniskette zu Grunde.

Störfallablauf

Bei Störfällen mit Wasserstoff lassen sich folgende Hauptphasen unterscheiden:

- H₂-Freisetzung,
- Verteilung und Vermischung mit Luft,
- Zündung,
- Verbrennung,
- Auswirkung der mechanischen und thermischen Lasten.

Viele wichtige sicherheitsrelevante Eigenschaften von H₂ unterscheiden sich erheblich von denen der bisher genutzten konventionellen Kohlenwasserstoffe. Erfolgreiches H₂-Risikomanagement erfordert somit eigene H₂-spezifische Analysen. Deshalb wurde eine durchgehende deterministische Beschreibung des Wasserstoffverhaltens mit eigenen selbstent-

wickelten numerischen Programmen erarbeitet.

Die wissenschaftliche Herausforderung besteht in der Entwicklung spezieller Software zur Simulation von transienten, turbulenten und reaktiven Strömungen in komplexen dreidimensionalen Geometrien. Die folgenden drei Abschnitte geben einen Überblick zu untersuchten Fragestellungen und Ergebnissen in den drei Bereichen „Verteilungssimulation“, „Verbrennungssimulation“, und „Experimente“.

Verteilungssimulation

Abb. 1 zeigt zwei Beispiele für die Analyse von H₂-Verteilungsvorgängen mit dem 3D Programm GASFLOW. Oben ist die zeitliche Entwicklung der H₂-Luft-Wolke dargestellt, die sich bei Leck an einem H₂-betriebenen Fahrzeug in einer Garage entwickeln könnte. Der brennbare Gemischbereich ist rot dargestellt (>4% H₂). Die Untersuchungen zeigten, dass bis zu einer bestimmten kritischen Leckrate (ca. 0,1 g/s) keine Gefährdung durch Ansammlung brennbarer Gemische besteht, weil natürliche Mischungsprozesse, wie Konvektion und Diffusion, eine ausreichende H₂-Verdünnung bewirken [5].

Abb.1b zeigt ein Beispiel aus Reaktorsicherheitsuntersuchungen, die zusammen mit Framatome ANP für den European Pressurized Reactor (EPR) durchgeführt wurden. Bei dem postulierten Kernschmelzunfall tritt Wasserstoff in das Containment ein (>10% H₂ innerhalb der roten Zone) und wird langfristig durch die installierten katalytischen Rekombinatoren ab-

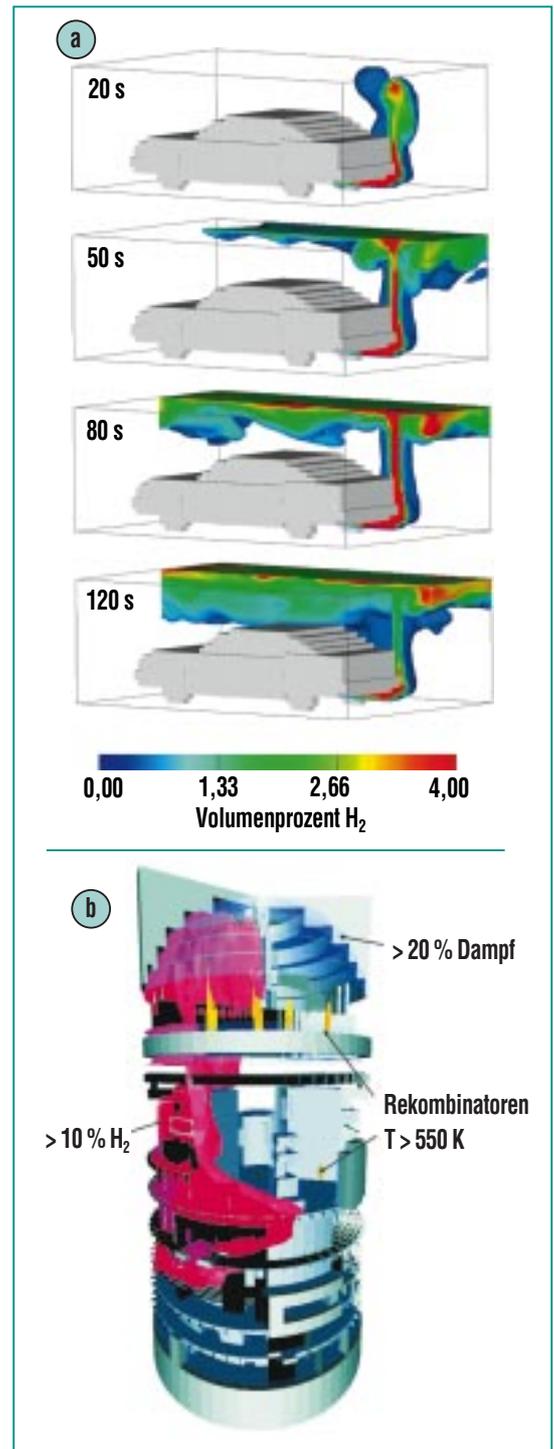


Abb.1: Simulation von Wasserstoff-Verteilungsprozessen mit dem 3D-Programm GASFLOW: a) H₂-Fahrzeug in einer Garage; b) H₂-Wolke in einem Reaktorsicherheitsbehälter.

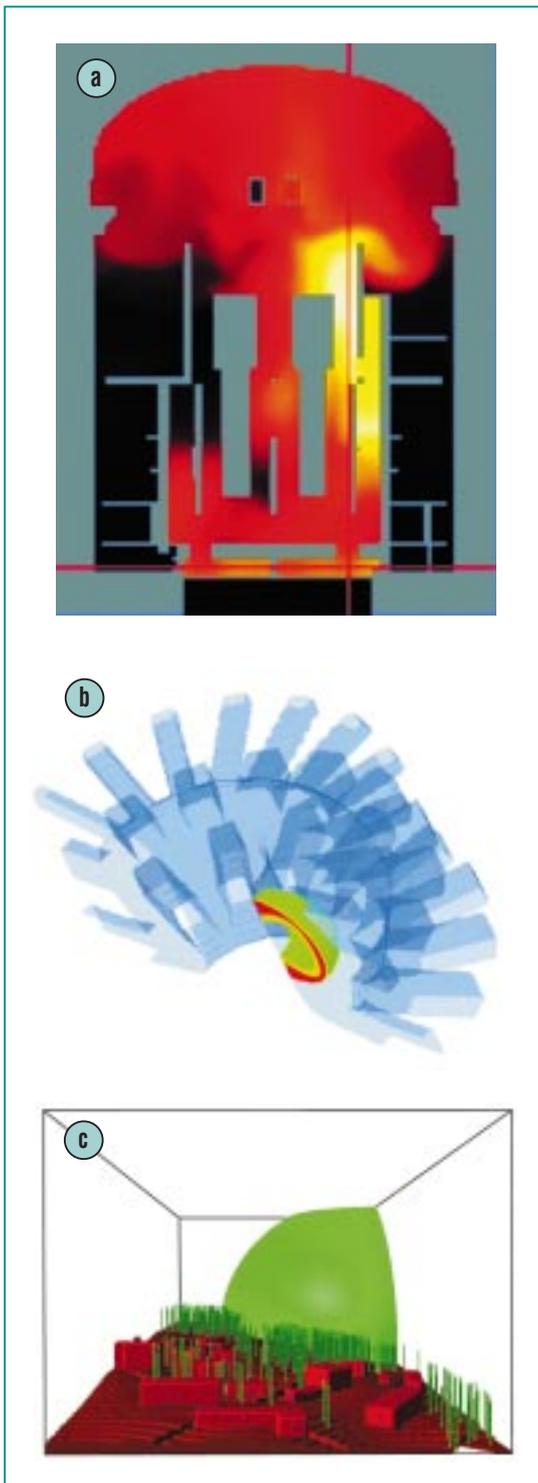


Abb. 2: Simulation von Wasserstoff-Verbrennungsprozessen mit den 3D-Programmen COM3D und DET3D: a) EPR-Containment, b) ITER-Fusionsreaktor, c) Versuchsgelände.

gebaut [1]. Framatome nutzt das GASFLOW Programm derzeit für die beiden in Finnland und Frankreich im Bau befindlichen EPR-Anlagen.

Verbrennungssimulationen

Für die Berechnung der verschiedenen Verbrennungsprozesse wurden im IKET dreidimensionale Programme entwickelt:

- FLAME3D für langsame Deflagration
- COM3D für schnelle turbulente Deflagration
- DET3D für Detonationen.

Abb. 2 zeigt drei Beispiele für die Anwendung der Verbrennungscodes COM3D und DET3D. Oben ist ein 2D-Schnitt durch die 3D-Geometrie des EPR während des Ausbrands einer H_2 -Luft-Dampf-Wolke (Abb. 1) im Containment dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die in diesem Fall – und in weiteren konservativen Parameterstudien – auftretenden Drucklasten unter dem Auslegungsdruck des Containments liegen [1]. Damit kann Containmentversagen durch H_2 -Verbrennung im Falle eines Kernschmelzunfalls mechanistisch ausgeschlossen werden.

Mit DET3D wurde eine lokale H_2 -Detonation im ITER-Torus simuliert [6]. Abb. 2b zeigt die hemisphärische Detonationswelle kurz nach der Zündung. Obwohl die dynamischen Drucklasten die globale Struktur des Torus nicht gefährden würden, könnten lokale Bauteile, wie z. B. Strahlfenster, Schaden erleiden. Derartige Unfallszenarien sollten durch Gegen-

maßnahmen sicher ausgeschlossen werden. Entsprechende Überlegungen werden derzeit vom ITER-Entwicklungsteam verfolgt.

Abb. 2c zeigt die Ausbreitung einer großskaligen Detonationsfront über ein besiedeltes und bewaldetes Gebiet, wie sie bei einem Unfall mit großen Mengen flüssigen Wasserstoffs (ca. 1 Tonne) auftreten könnte. Diese DET3D Simulation ergab, dass bei dem vorgesehenen Sicherheitsabstand zwischen Versuchsstand und Gebäuden keine Schäden an den belasteten Gebäuden auftreten würden.

Experimente

Voraussetzung für die Entwicklung und Validierung von vorhergesagfähigen Rechenmodellen ist eine gute experimentelle Datenbasis. Die Programmentwicklung wurde deshalb von Anfang an durch umfangreiche Versuchsprogramme begleitet, die sowohl eigene Messungen als auch gemeinsame Experimente mit russischen und französischen Partnern umfassten. In einer Reihe von EU-Vorhaben entstand in den letzten zehn Jahren eine breite Datenbasis für alle relevanten H_2 -Verbrennungsformen.

Im FZK selbst wurde mit Unterstützung der deutschen Industrie ein Wasserstoffversuchszentrum namens HYKA aufgebaut (Abb. 3a), das sowohl große Schutzbehälter für hochenergetische Versuche enthält (A1, A3), als auch eine große Testkammer, in der Wasserstoff unter kontrollierten Strömungsbedingungen freigesetzt und gezündet werden kann. Abb. 3b zeigt eine lokale Explosion in dieser Testkammer. Abb. 3c demonstriert den

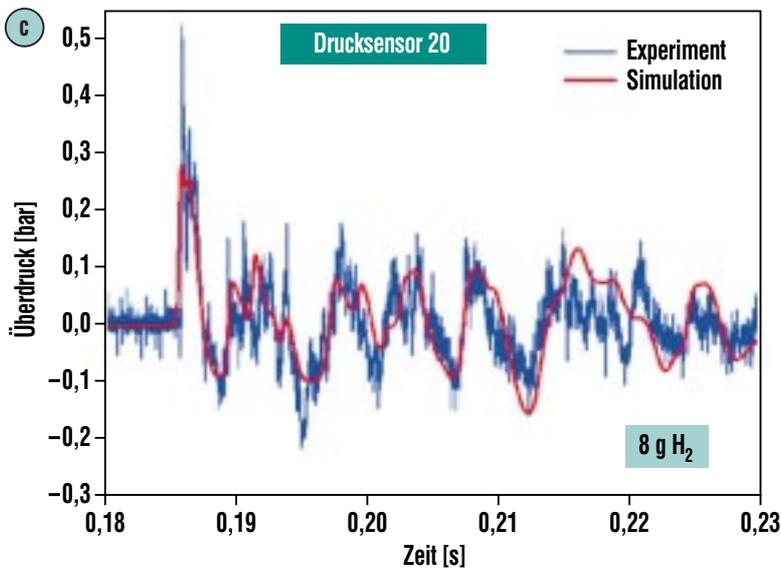


Abb. 3: Experimentelle Einrichtungen des Wasserstoffversuchszentrums HYKA und Vergleich Messung/Rechnung.

erreichten sehr guten Stand der numerischen Verbrennungssimulation. Abb. 3d zeigt einen H₂-Verbrennungstest in einem mit variablen Längsschlitz versehenen Versuchsrohr. Diese Daten dienen zur Validierung der entsprechenden theoretischen Modelle für teilversperrte Geometrien.

Ausblick

Das F+E-Programm des FZK soll zukünftig schwerpunktmäßig auf innovative Technologien für die grundlastfähige Energieversorgung ausgerichtet werden [7]. Dazu gehören die Teilprogramme „Nukleare Sicherheitsforschung“, „Kernfusion“ und „Rationelle Ener-

gieumwandlung“. In allen drei Bereichen liefern die hier beschriebenen Forschungsarbeiten bereits seit vielen Jahren international anerkannte Beiträge. Dieses Know-how stellt eine ideale Ausgangsbasis dar zur Bearbeitung der zukünftig anstehenden Aufgaben im Querschnittsthema „Wasserstoffsicherheit“.

Literatur

- [1] W. Breitung, W. Baumann, U. Bielert, B. Burgeth, S. Dorofeev, B. Kaup, A. Kotchourko, G. Necker, R. Redlinger, P. Roysl, J. Starflinger, G. Stern, J.R. Travis, A. Vesper, Z. Xu, *FZKA 7085 (2005)*
- [2] W. Breitung, U. Bielert, G. Necker, A. Vesper, F.J. Wetzel, K. Pehr, *Proc. 13th World Hydrogen Energy Conf., Beijing, China, June 12-15, 2000, p. 1175*
- [3] W. Breitung, *Proc. Intern. Conf. on Hydrogen Safety, Pisa, 8-10 Sept. 2005 (on CD)*
- [4] R. Redlinger, W. Baumann, W. Breitung, S. Dorofeev, W. Gulden, M. Kuznetsov, A. Lelyakin, G. Necker, P. Roysl, R.K. Singh, J.R. Travis, A. Vesper, *Fusions Eng. & Design, Vol. 75-79 (2005), p. 1233*
- [5] W. Breitung, G. Necker, B. Kaup, A. Vesper, *Proc. of 4th Int. Symp. on Hydrogen Power, Strahlsund, 9.-14. Sept. 2001, p. 368*
- [6] W. Baumann, W. Breitung, B. Kaup, R. Redlinger, J.R. Travis, *FZKA 6584 (2001)*
- [7] J. Hoffmann, *Presseinformation 3/2006, www.fzk.de (2006)*

Synthesekraftstoffe und Wasserstoff aus Biomasse

N. Dahmen, E. Dinjus, ITC

Fossile Energieträger stellen die Basis der heutigen Energieversorgung dar. Auch wenn die Prognosen über den Zeitraum ihrer vollständigen Ausbeutung sich deutlich unterscheiden, so ist an ihrer langfristigen Verknappung nicht zu zweifeln. Kurz- und mittelfristige Probleme betreffen die Versorgungssicherheit, Kosten von Erschließungen und Transport sowie die Forderung nach einem umweltschonenderen Umgang mit Ressourcen. Wie die aktuellen Entwicklungen der Weltmarktpreise für Erdöl oder -gas zeigen, reichen bereits kleine Ursachen aus, die im globalen Maßstab gravierende Preiserhöhungen mit entsprechenden Folgen für die Weltwirtschaft nach sich ziehen.

Die konsequente Nutzung erneuerbarer Energieträger reduziert diese Unsicherheiten und leistet darüber hinaus einen Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Während Wasserkraft, Geothermie, Solarenergie und Windkraft primär zur Erzeugung von Strom und Wärme geeignet sind, kommt Biomasse als einzigem erneuerbaren Kohlenstoffträger eine besondere Bedeutung zur Herstellung von Kraft- und Brennstoffen sowie organischen Grundchemikalien zu. Der effizienten Nutzung dieser einzigartigen Eigenschaft von Biomasse kommt daher eine besondere Bedeutung zu [1].

Das Forschungszentrum leistet in diesem Zusammenhang zwei zukunftsweisende Beiträge: die Herstellung von Synthesekraftstoffen aus trockener Biomasse und die Erzeugung von Wasserstoff aus nasser Biomasse.

Mit dem sogenannten bioliq-Verfahren können aus trockener Restbiomasse synthetische Kraftstoffe hergestellt werden [2,3]. Diese sind reiner und daher umweltverträglicher und leistungsstärker als erdölstämmige Kraftstoffe und lassen sich auf die Anforderungen der Automobil-Hersteller auch im Hinblick auf die strenger werdenden Abgas-Normen maßschneidern. Die Entwicklung ist primär auf die Nutzung von relativ preisgünstiger, bisher weitgehend ungenutzter Biomasse wie Getreidestroh, Pflegeheu oder Restholz ausgerichtet. Diese enthalten mehr Asche und Heteroatome als etwa rindenfreies Holz und machen die Entwicklung entsprechend angepasster Verfahren notwendig. Allein die vorhandenen ungenutzten

Mengen an Stroh oder Holzabfällen könnten über 10 % des derzeitigen Kraftstoffbedarfs in Deutschland decken. Einer effizienten Nutzung von Biomasse standen oft ihre niedrige Energiedichte und das regional verteilte Aufkommen im Wege, wodurch weite Transportwege unwirtschaftlich werden. Das bioliq-Konzept löst dieses Problem, indem aus der Biomasse in dezentral aufgestellten Anlagen zunächst ein energiedichtes Zwischenprodukt erzeugt wird (s. Abb. 1 und 2). Dazu wird die zerkleinerte, trockene Biomasse, z. B. Strohhäcksel, zur schnellen Pyrolyse mit heißem Sand als Wärmeträger gemischt. Die Aufheizung und Pyrolyse der Biomassepartikel auf etwa 500 °C sowie die Kondensation der Pyrolysedämpfe er-

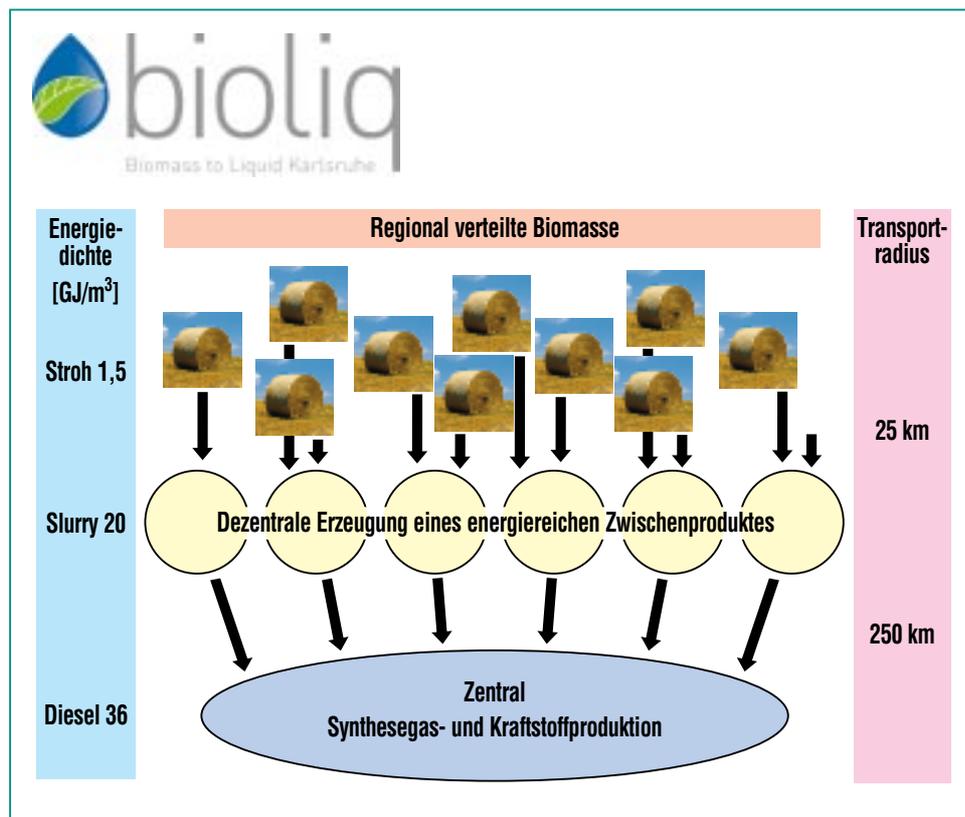


Abb. 1: Das zweistufige bioliq-Konzept zur Nutzung von Biomasse.

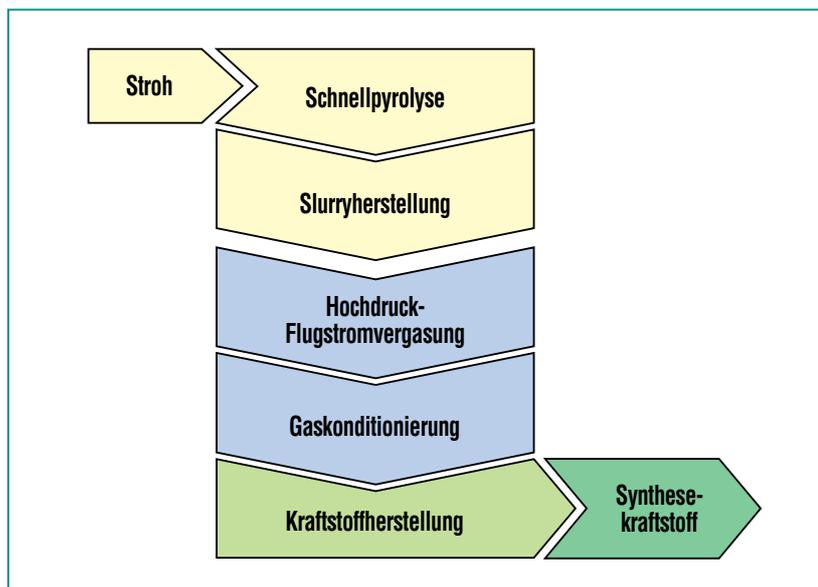


Abb. 2: Die Verfahrensschritte der Synthesekraftstoffherstellung.

folgen im Verlauf von Sekunden. Es entsteht hauptsächlich ein flüssiges Kondensat, das Pyrolyseöl, Koks und nicht kondensierbares Gas, das prozessintern zur Aufheizung des Wärmeträgers genutzt werden kann. Der Pyrolysekoks wird zermahlen und mit Pyrolyseöl vermischt. Diese Mischung, der sogenannte Slurry, wird dann in einem großen, zentralen Flugstrom-Druckvergaser bei Drücken bis zu 80 bar und Temperaturen über 1200 °C zu Synthesegas (einer Mischung aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff) umgesetzt, aus dem über gängige chemische Verfahren Kraftstoffe hergestellt werden können.

Nachdem die technische Machbarkeit des Verfahrens in eigenen und in Versuchsanlagen der beteiligten Industriepartner nachgewiesen wurde, wird im Forschungszentrum nun eine Pilotanlage für einen Durchsatz von 500 kg/h Biomasse errichtet. Zielprodukt ist Methanol, das zu Kraft-

stoff weiterverarbeitet werden kann. Die Anlage hat Demonstrationscharakter und wird Bestandteil eines F+E-Programms, an dem derzeit fünf Institute des Forschungszentrums beteiligt sind. Hierdurch wird die Weiterentwicklung, Erweiterung und Optimierung des Verfahrens, gestützt auf wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse, sichergestellt.

Die zweite Verfahrensentwicklung des Forschungszentrums dient der Erzeugung von Wasserstoff durch hydrothermale Vergasung nasser Biomasse [4-6]. Wasserstoff ist als sekundärer Energieträger insbesondere vor dem Hintergrund seiner Nutzung in Brennstoffzellen von großem Interesse. Beim Umgang mit Wasserstoff stellen sich auch Fragen nach der Sicherheit oder seiner Speicherung auf der Basis von Nanomaterialien. Sie werden in der interdisziplinären Forschungsgruppe des Forschungszentrums, der HyTech-Group, bearbeitet. Für die Was-

serstoffherzeugung sind auf lange Sicht auch hier biogene Rohstoffe anstelle des bisher eingesetzten Erdöls oder -gases einzusetzen. Die Ausgangsstoffe der hydrothermalen Vergasung sind Biomassen mit einem Wassergehalt bis zu 90 %. Dies können Rückstände aus der Landwirtschaft, aber auch aus der Lebensmittel- oder Getränkeindustrie sein. Bei Temperaturen bis zu 700 °C und Drücken bis zu 300 bar reagiert die Biomasse mit Wasser nahezu vollständig und es entstehen die Hauptprodukte Wasserstoff, Methan und Kohlendioxid. Chemisch gesehen findet hier eine Wasserspaltung durch Biomasse statt; der gewonnene Wasserstoff stammt also zum überwiegenden Teil aus dem Wasser. Das Kohlendioxid lässt sich effizient durch eine Druckwasserwäsche bis auf geringe Restgehalte aus dem Produktgas entfernen. Abb. 3 zeigt die so erzielten Gasausbeuten nach der Umsetzung von Mais-silage. In der Versuchsanlage VERENA wird die technische Entwicklung dieses Verfahrens vorangetrieben. Parallel dazu werden grundlegende Fragen zum chemischen Ablauf der hydrothermalen Umsetzung von Biomasse bearbeitet. Ergebnisse dieser Arbeiten erlauben die reaktionstechnische Verbesserung des Verfahrens und seine Übertragung auf andere Anwendungen, etwa die der Direktverflüssigung von Biomasse, die zu anderen Nutzungsmöglichkeiten führen kann.

Thermochemische Verfahren wie die hier beschriebenen sind großtechnisch einsetzbar. Mit ihnen kann die Nutzung von trockener und nasser Biomasse substantielle

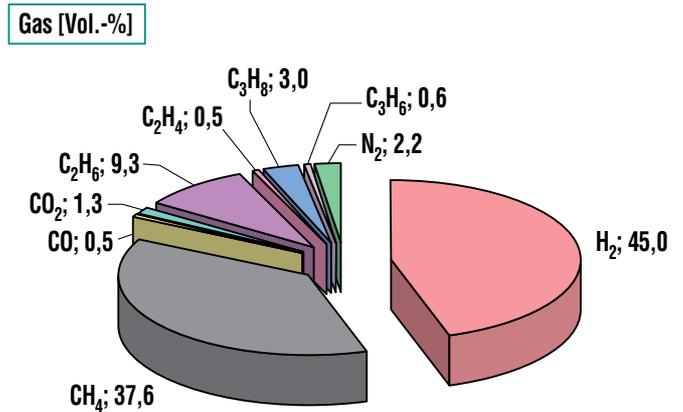


Abb. 3: Maissilage als Ausgangsprodukt für die Hydrothermale Vergasung und die Produktgasverteilung nach der CO₂-Abtrennung.

Beiträge zur Energieversorgung, zu der auch die Erzeugung von Kraft- und Brennstoffen zu rechnen sind, leisten. Im Verbund mit anderen Formen der Nutzung von

Biomasse lassen sich Stoff- und Energieverbünde aufbauen, wie sie schon lange für die Erdölverarbeitung existieren. Auf der Basis solcher Bio-Raffinerien wird Bio-

masse effizient und wirtschaftlich für die Großtechnik erschlossen.

Literatur

- [1] L. Leible, S. Kälber, G. Kappler, S. Lange, E. Nieke, P. Proplesch, D. Wintzer, B. Fürniß, *Nachrichten* 36 (2004) 206-212
- [2] E. Henrich, E. Dinjus, *Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe", Band 24, Landwirtschaftsverlag Münster, 2004, 298-337*
- [3] E. Henrich, E. Dinjus, K. Raffelt, R. Stahl, F. Weirich, *Nachrichten* 35 (2003) 92-98
- [4] N. Boukis, V. Diem, U. Galla, P. d'Jesus, A. Kruse, H. Müller, E. Dinjus, *Nachrichten* 37 (2005) 116-123
- [5] N. Boukis, A. Kruse, U. Galla, V. Diem, E. Dinjus, *Nachrichten* 35 (2003) 99-104
- [6] A. Kruse, E. Dinjus, *Z. Phys. Chem.* 219 (2005) 341-366

Supraleitende Strombegrenzer und Supraleiterentwicklung für die Energietechnik

P. Komarek, W. Goldacker, M. Noe, ITP

Supraleitung ermöglicht den Stromtransport fast ohne Verluste. Dieser Gedanke fasziniert Wissenschaftler und Ingenieure seit der Entdeckung der Supraleitung im Jahre 1911. Jedoch erst für die 1986 entdeckten keramischen Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL) genügt eine preiswerte und effiziente Kühlung mit flüssigem Stickstoff, was für einen Einsatz in der Energietechnik entscheidend ist.

Einen Schwerpunkt der Forschungsarbeiten im Institut für Technische Physik (ITP) bildet die Entwicklung von supraleitenden Betriebsmitteln der Energietechnik. Insbesondere bei neuen Betriebsmitteln, wie einem supraleitenden magnetischen Energiespeicher und einem supraleitenden Strombegrenzer (SSB), wurden am ITP wichtige Meilensteine in der Entwicklung erzielt.

Da sich Kurzschlüsse in elektrischen Netzen nicht vermeiden lassen, müssen alle installierten Betriebsmittel so beschaffen sein, dass sie den elektrischen und mechanischen Beanspruchungen durch die im Vergleich zum Normalbetrieb 50 bis 100 mal größeren Kurzschlussströme standhalten. Dies erfordert einen hohen technischen und finanziellen Aufwand, der durch den Einsatz eines SSB erheblich reduziert werden könnte. Weitere technische Vorteile des Einsatzes von SSB sind die Erhöhung der Netzstabilität, die Verringerung von Netzrückwirkungen und Spannungsabfällen, der flexiblere Anschluss von Generatoren und geringere Netzverluste.

Im Normalbetrieb hat der SSB einen vernachlässigbaren Widerstand und nahezu keine Verluste, die Impedanz des Begrenzers ist sehr gering. Durch einen hohen

Kurzschlussstrom verliert der Supraleiter innerhalb weniger tausendstel Sekunden selbsttätig seine Supraleitfähigkeit und wird zum Widerstand, der den Strom wirksam und sicher begrenzt.

In der Mittelspannungsebene bis zu 36.000 Volt hat der SSB, gegenüber den bisher eingesetzten Betriebsmitteln zur Strombegrenzung wie Sicherungen und Is-Begrenzern, den Vorteil der schnellen und automatischen Wiedereinsatzbereitschaft nach einer nur kurzen Erholungszeit zum Rückkühlen des Supraleiters. In der Hochspannungsebene von mehr als 100.000 Volt gibt es kein konventionelles Betriebsmittel zur Begrenzung von Kurzschlussströmen. Hier zeigen Untersuchungen und Netzstudien neben den technischen Vorteilen ein sehr hohes wirtschaftliches Einsparpotenzial durch den SSB.

Im Rahmen eines BMBF-Verbundprojektes wurde gemeinsam mit ACCEL, Nexans Superconductors und anderen Partnern ein 10 kV, 10 MVA SSB entwickelt und erfolgreich getestet (Abb. 1). Von April 2004 bis März 2005 fand im Netz der RWE bei Siegen der bisher weltweit erste Feldtest dieses Strombegrenzers statt. Dabei konnte erstmals die Tauglichkeit des Konzepts in der rauen Umgebung eines Feldtests eindrucksvoll demonstriert werden. Am ITP waren die Materialcharakterisierung und die Entwicklung der supraleitenden Komponenten Schwerpunkte der Arbeiten. Derzeit befindet sich dieser 10-MVA-Begrenzer zu einem abschließenden Langzeittest im ITP.



Abb. 1: Aufbau eines 10 MVA, 10 kV supraleitenden Strombegrenzers.

In einem weiteren Verbundprojekt unter Federführung von Nexans SuperConductors wird zur Zeit der weltweit erste SSB für die Hochspannungsebene von mehr als 100.000 Volt entwickelt. Der Einsatzort ist die Kupplung von Netzgruppen in dieser Spannungsebene. Das Hochspannungsnetz wird heute in galvanisch getrennte Netzgruppen unterteilt, um zu hohe Kurzschlussströme zu verhindern. Diese Netzgruppen werden über Transformatoren aus dem Höchstspannungsnetz gespeist. Die Zahl dieser Transformatoren wird so gewählt, dass bei Ausfall eines Transformators noch ausreichend Redundanz besteht. Durch den Einbau von SSBs könnten Netzgruppen gekuppelt werden und somit Transformatoren entfallen. Das birgt sehr hohe Einsparpotenziale. Das ITP entwickelt in diesem Projekt die Hochspannungstechnik und führt spezielle Tests an Komponenten durch. Eine zentrale Frage ist dabei unter anderem die elektrische Isolation von Materia-

lien in flüssigem Stickstoff, denn die Isolierstoffe dürfen im Laufe der Betriebszeit von bis zu 30 Jahren nicht nennenswert altern.

Als Hochtemperatursupraleiter in den genannten Strombegrenzer-Projekten kam bisher „BSCCO(2212)“ ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$) als Massivkörper mit einer kritischen Temperatur von 85 Kelvin zum Einsatz. In Hochstromkabeln oder Wicklungen (z.B. Motoren, Generatoren) ist „BSCCO(2223)“ als Band mit Silberhülle und einer kritischen Temperatur von 110 K der Standard. Ein entscheidender Nachteil dieses Leiters und einschränkend für die Anwendungsbreite ist der relativ hohe Preis des Materials und die begrenzte Magnetfeldverträglichkeit bei Kühlung mit flüssigem Stickstoff.

Als Konsequenz konzentriert sich gegenwärtig nahezu die gesamte weltweite Leiterentwicklung auf die zweite Generation der Hochtemperatursupraleiter, die „YBCO-Bandleiter“ ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$), mit einer

kritischen Temperatur von 92 Kelvin, die im flüssigen Stickstoff betrieben eine wesentlich bessere Magnetfeldverträglichkeit aufweisen. Ein entscheidender Schritt für die Anwendung wird die erfolgreiche Entwicklung einfacher und ökonomischer chemischer Beschichtungsverfahren in den nächsten drei bis fünf Jahren sein, die diesem Leitertyp einen deutlichen Preisvorteil bringen sollen. In einem vom ITP koordinierten virtuellen Institut der Helmholtz-Gemeinschaft werden solche Leiter intensiv entwickelt. Erste Untersuchungen von YBCO-Bandleitern, z. B. in Strombegrenzern oder Magneten zeigen bereits viel versprechende Resultate.

Der erst seit 2001 bekannte Supraleiter Magnesiumdiborid besitzt zwar eine kritische Temperatur von nur 39 Kelvin, jedoch sehr vorteilhafte andere Supraleitereigenschaften und kann als preiswerter Runddraht hergestellt werden. Diese Drähte werden im ITP

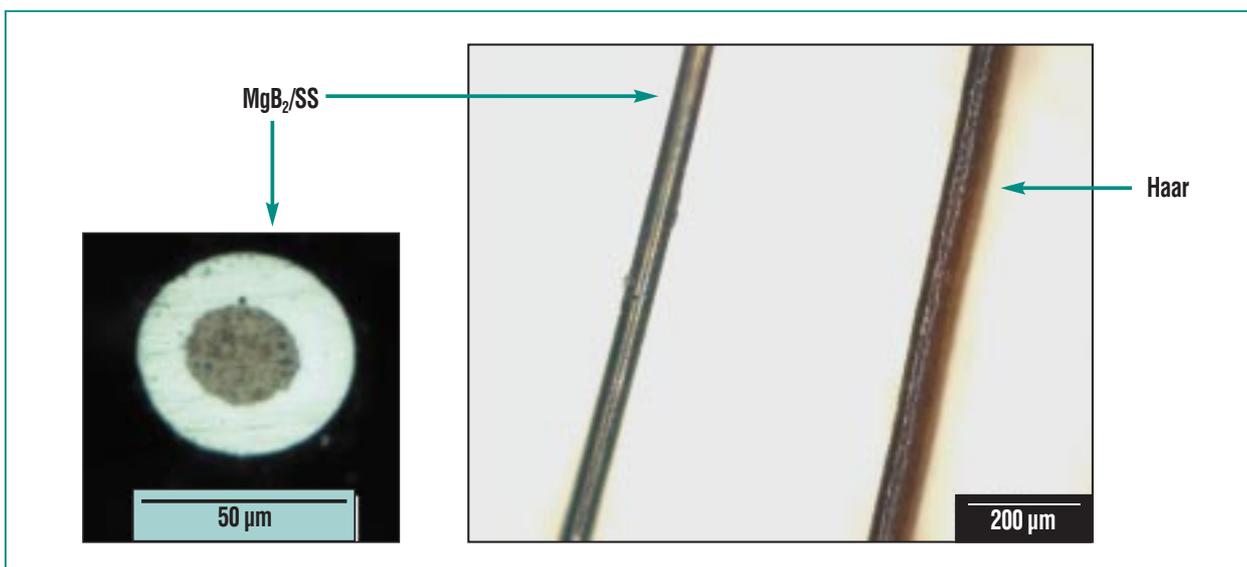


Abb. 2: Ultradünner (0,05 mm) MgB₂-Draht (Querschnitt zeigt MgB₂ im Stahlrohr) für Sensoranwendung in flüssigem Wasserstoff.

entwickelt und bieten sich für die Flüssig-Wasserstofftechnologie und für Anwendung im Weltraum an mit einer Betriebstemperatur im Bereich 4 bis 20 Kelvin. Erste Anwendungen im Satellit und in Wasserstofftanks wurden bereits vom ITP mit den Partnern NASA und TU Dresden realisiert (Abb. 2).

Perspektiven

Die Anwendung der Supraleitung in der Energietechnik erscheint bei vielen Betriebsmitteln sehr attraktiv. Eine zukünftige erfolgreiche Markteinführung wird jedoch entscheidend davon abhängen, inwieweit es gelingt, leistungsfähige und

preiswerte Supraleiter herzustellen und eine zuverlässige und sichere Kryokühlung zu gewährleisten. Die bisher erzielten Fortschritte sind außerordentlich erfolgversprechend.

Energie aus Abfall

H. Seifert, ITC

Einleitung: Umweltnutzen der energetischen Abfallverwertung

Bis in die 90er Jahre des letzten Jahrhunderts war der primäre Nutzen der Hausmüllverbrennung mit zwei wesentlichen Zielen verknüpft: der drastischen Reduktion der zu beseitigenden Abfallmenge und der Inertisierung der Abfälle bzw. der verbleibenden Reststoffe durch Zerstörung im Abfall enthaltener organischer bzw. die Abtrennung anorganischer Schadstoffe, insbesondere der Schwermetalle.

In neuerer Zeit gewinnt als weiterer Aspekt die Ressourcenschonung an Bedeutung, beispielsweise durch Metallrückgewinnung und Verwertung der Schlacken als Baustoff, vor allem aber durch die Nutzung der im Abfall enthaltenen Energie, wobei fossile Brennstoffe substituiert werden. Dieser letzte Punkt führt unmittelbar zu einem hoch aktuellen Umweltnutzen von

Müllverbrennungsanlagen: ihr Beitrag zum Klimaschutz durch CO₂-neutrale Energienutzung infolge des großen biogenen Anteils im Rest-Hausmüll, auch bei vorhandenen Getrennt-Sammel-Systemen.

Verminderte CO₂-Emission durch energetische Abfallnutzung

In den 25 EU-Staaten werden von den jährlich anfallenden 235 Mio. Tonnen Hausmüll 18 % stofflich verwertet und 13,5 % kompostiert. Von der verbleibenden Restmüllmenge werden z. Zt. immer noch über 50 % deponiert. In Deutschland betrug 2003 die Abfallmenge 49,5 Mio. Tonnen. Von den nicht verwerteten 20,6 Mio. Tonnen wurden 54 % unter Energienutzung verbrannt. Diese Zahl liegt heute bei ca. 14 Mio. Tonnen und somit bei nahezu 70 % der nicht verwertbaren Abfällen, da seit 2005

ein Ablagerungsverbot für unbehandelte Abfälle gilt.

Zur Bewertung der Klimarelevanz der CO₂-Emission bei der Abfallverbrennung ist nur der fossile Anteil des Kohlenstoffes im Abfall heranzuziehen. Es ist also erforderlich, den biogenen und den fossilen Energieanteil im Hausmüll zu ermitteln. Für Deutschland liegt ersterer bei ca. 60 %.

Zur Abschätzung der CO₂-Einsparung durch energetische Nutzung von Abfall wird die auf die Zielenergiemenge Strom bzw. Wärme bezogene CO₂-Emissionsfracht ermittelt, wobei die unterschiedlichen energetischen Wirkungsgrade von Müllverbrennungsanlagen (MVA) und fossilen Kraftwerken bzw. Heizkraftwerken (HKW) zu berücksichtigen sind (Abb. 1) [1].

Die Einsparung wurde im Vergleich zweier Referenzprozesse mit äquivalenter Strom- bzw. Wärmemenge berechnet, wobei eine Referenzanlage zur Substitution elek-

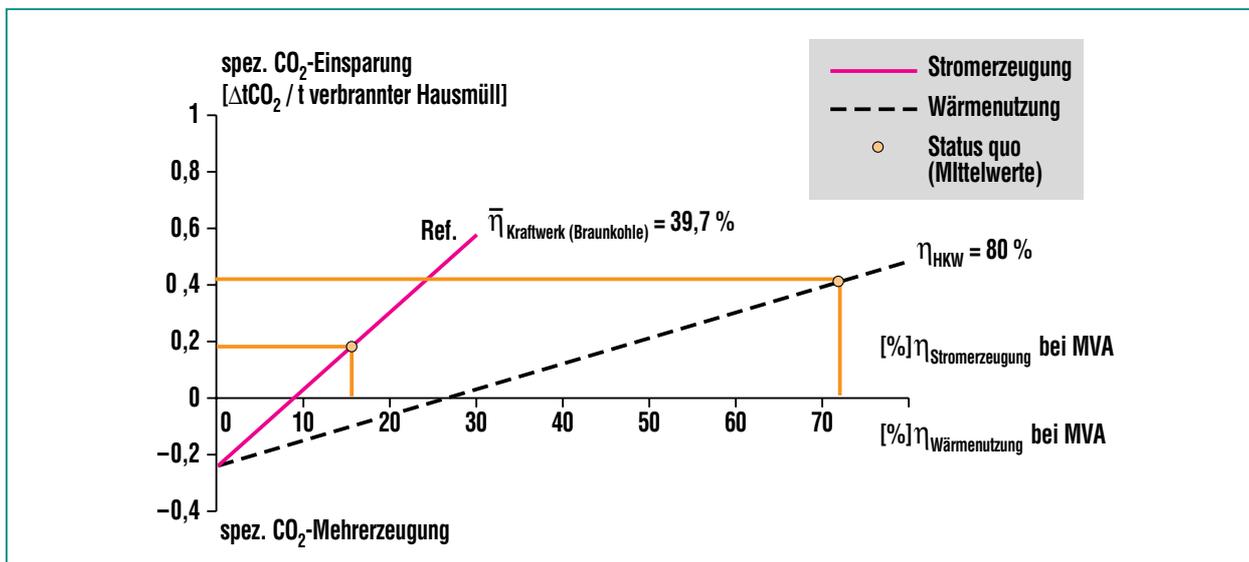


Abb. 1: Potentiale der CO₂-Einsparung durch Energienutzung aus Hausmüll (mit einem mittleren Heizwert von H_U = 9,8 GJ/t_{Abfall}) in Abhängigkeit vom energetischen Wirkungsgrad einer MVA.

trischer und eine für die Substitution thermischer Energie gewählt wurde. Die Grafik zeigt entsprechend dem Wirkungsgrad der MVA ein erhebliches Einsparpotenzial bei der Substitution von elektrischer Energie aus Braunkohlekraftwerken wie auch bei der Substitution von thermischer Energie aus einem Heizkraftwerk.

Die jährlich in Deutschland verbrannte Hausmüllmenge von ca. 14 Mio. Tonnen ergibt mit der entsprechenden Energienutzung eine Einsparung von ca. $3,2 \cdot 10^6$ Tonnen CO_2 oder 0,9 % der deutschen jährlichen CO_2 -Emission im Energiebereich ($368 \cdot 10^6 \text{ t CO}_2$).

Verfahren der energetischen Nutzung von Siedlungsabfällen

Zur Verbrennung von Siedlungsabfällen sind verschiedene Verfahren gebräuchlich, für unbehan-

delteten Abfall überwiegend die Monoverbrennung auf dem Rost (für Hausmüll) bzw. in der Wirbelschicht (für Klärschlamm). Dabei reicht die Energienutzung von der vollständigen Verstromung bis zur reinen Wärme-Nutzung (meist als Dampf) mit allen Zwischenstufen der Kraft-Wärme-Kopplung.

Die Coverbrennung von Abfällen im Kraftwerk, in Zementöfen oder Industriefeuerungen erfordert eine Aufbereitung des Abfalls zu so genannten Sekundär- oder Ersatzbrennstoffen. Für deren Einsatz in Kraftwerken muss neben den mechanischen, chemischen und kalorischen Eigenschaften – z. B. dem Heizwert – zusätzlich das Abbrandverhalten, bekannt sein.

Dieses wird am ITC-TAB mit dem Schachtreaktor KLEAA (Karlsruher Laboranlage zur Ermittlung des Abbrandes von Abfällen) [2] ermittelt. Aus dem zeitlichen Verlauf der Reaktionsfront lässt sich als

„brennstoffspezifische Kennzahl“ die Reaktionsfrontgeschwindigkeit ableiten, die das Abbrandverhalten von Festbrennstoffen gut beschreibt. Das dargestellte Beispiel (Abb. 2) zeigt erhebliche Unterschiede zwischen dem Sekundärbrennstoff BRAM (Brennstoff aus Müll) und dem ebenfalls in einer mechanisch-biologischen Vorbehandlung erzeugten MBA-Unterkorn (Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung) auf. Deren zum Abbrandende sprunghaft ansteigende Reaktivität muss bei der Auslegung und beim Betrieb der Verbrennungsanlage berücksichtigt werden. Dazu wurde ein Reaktionsmodell entwickelt, das an der Rostfeuerungsanlage TAMARA validiert wird.

Bei der Mitverbrennung von Abfällen in Kesselanlagen sind auch die Auswirkungen spezifischer Inhaltsstoffe, z. B. der Alkalien und Halogene auf Korrosion und Ver-

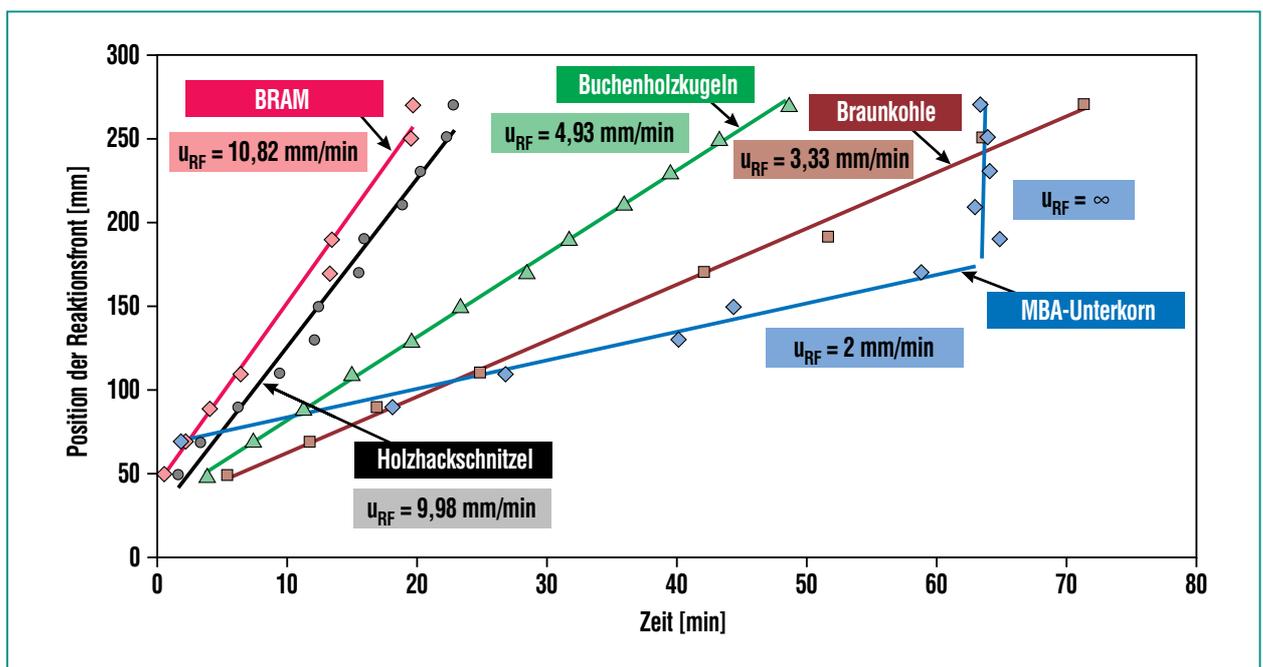


Abb. 2: Reaktionsfrontgeschwindigkeit (u_{RF}) von verschiedenen Brennstoffen.

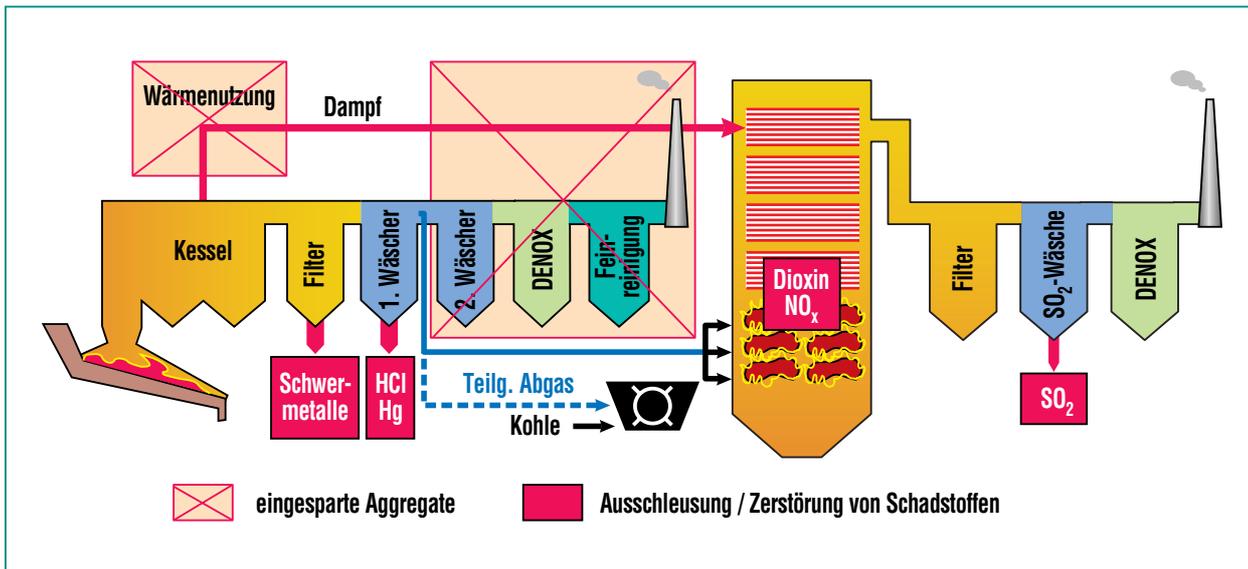


Abb. 3: Kombination von Müllverbrennung und Kraftwerk nach dem UPSWING-Verfahren (Unification of Power Plant with Solid Waste Incineration on the Grate).

schlackung zu beachten. Dieser Aspekt wird mit einer am ITC-TAB entwickelten mineralogischen Charakterisierungsmethode bearbeitet.

Bei der „Kombiverbrennung“ nach dem im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten UPSWING-Verfahren [3] wird eine stark vereinfachte Abfallverbrennungsanlage vor ein Kohlekraftwerk geschaltet (Abb. 3). Nach einer Entstaubung und sauren Wäsche zur Schwermetall-, Salzsäure- und Quecksilber-Abscheidung verbleiben im Rauchgas die Schadstoffe Dioxine, Schwefel- und Stickoxide, die in der Kraftwerksfeuerung, bzw. in deren Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) abgereinigt wer-

den. Dieses im Rahmen eines EU-Projektes weiter entwickelte Verfahren führt zu erheblichen Investitionsersparungen bei der MVA und verbesserten Verstromungswirkungsgraden durch die Kopplung mit dem Kraftwerk.

Potentiale der energetischen Abfallverwertung

Auf Basis der aufgezeigten Entwicklungsansätze lassen sich bei den vorgestellten Verfahren deutliche Wirkungsgradverbesserungen bei reduzierten Kosten erreichen. Würde zudem der Resthausmüll vollständig energetisch genutzt, könnten bis zu 6 % der

fossil erzeugten Elektrizität in Deutschland durch Strom aus Abfall substituiert werden. Dabei würde die CO₂-Emission durch energetische Abfallnutzung um mehr als sechs Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr, entsprechend 1,6 % der CO₂-Gesamtemission im Energiebereich, verringert werden.

Literatur

- [1] H. Seifert, B. Johnke, (2004), *CO₂-Minderung durch energetische Abfallverwertung*, GVC/DECHEMA-Jahrestagung 2004, *Chemie Ingenieur Technik* 2004, 76, No. 9, p. 1322
- [2] S. Bleckwehl, M. Riegel, Th. Kolb, H. Seifert, *Charakterisierung der verbrennungstechnischen Eigenschaften fester Brennstoffe*, VDI-Berichte Nr. 1888, 2005, S.93-100
- [3] J. Vehlow, H. Hunsinger, S. Kreis, H. Seifert, (2000) *Das UPSWING-Verfahren – Der Schlüssel zur kostengünstigen Abfallverbrennung*, *Nachrichten*, Jahrgang 32, 3/2000

MIPAS entdeckt Salpetersäurewolken über der Antarktis

M. Höpfner, H. Fischer, IMK

Die Ozonschicht der Erde befindet sich in einer Höhe von 20–30 km in der Stratosphäre und absorbiert die für Lebewesen schädliche UV-Strahlung. Mit der Entdeckung des Ozonlochs über der Antarktis und dessen wissenschaftlicher Erklärung vor 20 Jahren [1, 2, 3] ist deutlich geworden, dass diese Schutzschicht ernsthaft gefährdet ist: in der Stratosphäre reichert sich Chlor durch vom Menschen hergestellte Fluorchlorkohlenwasserstoffe an. Unter normalen Bedingungen ist Chlor in Form von Salzsäure (HCl) und Chlornitrat (ClONO_2) gebunden und kann kein Ozon zerstören. In der Polarnacht werden jedoch in der arktischen und insbesondere der antarktischen Stratosphäre in Höhen von 15 bis nahezu 30 km Temperaturen von unter -78 °C erreicht, die die Bildung polarer stratosphäri-

scher Wolken ermöglichen. Auf den Oberflächen dieser Wolken bilden sich aus Salzsäure und Chlornitrat molekulares Chlor (Cl_2) und Salpetersäure (HNO_3). Das molekulare Chlor wird im Frühjahr bei Sonnenaufgang über dem Pol durch das Licht aufgespalten und kann in dieser „aktiven“ Form sehr effektiv Ozon abbauen. In bestimmten Höhenbereichen kommt es dadurch zu einer beinahe vollständigen Zerstörung von Ozon. Ein solcher Prozess kann allerdings nur ablaufen, wenn das aktive Chlor nicht zuvor wieder durch Stickoxide in Chlornitrat überführt und somit passiviert wird. Hier kommen polare stratosphärische Wolken ein weiteres Mal ins Spiel: durch Aufnahme von Salpetersäure werden Stickoxide aus der Stratosphäre entfernt (Denitrifizierung)

und stehen am Ende des Winters nicht mehr für eine Passivierung des Chlors zur Verfügung.

Aufgrund ihrer herausragenden Rolle bei der Zerstörung der Ozonschicht wurden die polaren stratosphärischen Wolken zu einem wichtigen Untersuchungsobjekt. Mittlerweile ist bekannt, dass sie sowohl aus Wassereis, aus unterkühlten flüssigen Tröpfchen von Wasser/Schwefelsäure/Salpetersäure ($\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$) und aus festen salpetersäurehaltigen Teilchen bestehen können.

Gerade die Wolken des letztgenannten Typs sind es, die für die Denitrifizierung der Stratosphäre verantwortlich sind, aber noch die meisten Rätsel hinsichtlich ihrer genauen Zusammensetzung und Entstehung aufgeben [4].



Abb. 1: Polare stratosphärische Wolken über McMurdo, Antarktis (Quelle: Cherie Ude).

Mit dem Start des vom IMK konzipierten und wissenschaftlich betreuten Michelson Interferometers für Passive Atmosphärische Sondierung (MIPAS) auf dem europäischen Umweltsatelliten Envisat (Abb. 2) [5] ist es erstmals überhaupt möglich, die Entwicklung und Zusammensetzung von polaren stratosphärischen Wolken zeitlich und räumlich kontinuierlich – sogar in der Polarnacht – zu untersuchen.

Auf seiner polaren Umlaufbahn misst MIPAS die von der Erdatmosphäre emittierte infrarote Strahlung mit hoher spektraler Auflösung. Durch Vergleiche zwischen MIPAS-Messungen und umfangreichen Simulationen mit einem am IMK entwickelten Strahlungstransportprogramm gelang es, neben den anderen Typen auch po-

lare stratosphärische Wolken aus Salpetersäuretrihydrat-Kristallen in weiten Bereichen der winterlichen Stratosphäre eindeutig nachzuweisen [6].

Die hier entwickelten Methoden zur Unterscheidung der jeweiligen Zusammensetzung ermöglichten es, die Entwicklung dieser hohen Wolken über der Antarktis ab ihrem ersten Auftreten Ende Mai 2003 zu verfolgen [7]. Dabei ergab sich ein überraschendes Bild (Abb. 3): obwohl die Temperaturen in der Stratosphäre schon derart tief waren, dass sich Salpetersäuretrihydrat-Kristalle hätten bilden können, maß MIPAS drei Wochen lang nur flüssige Teilchen. Dann traten plötzlich am 10./11. Juni erste Wolken aus Salpetersäuretrihydrat im Bereich der antarktischen Halbinsel auf und breiteten

sich in den darauf folgenden Tagen wie ein Gürtel um den antarktischen Kontinent aus. In den folgenden Monaten bis zum Ende des antarktischen Winters waren Salpetersäuretrihydrat-Partikel immer vorhanden und bildeten häufig den am weitesten verbreiteten Wolkentyp.

Die Erklärung dieses abrupten Erscheinens von Salpetersäuretrihydrat-Wolken lieferten Simulationsrechnungen der Wolkenbildung in Kombination mit einem räumlich hoch aufgelösten Modell der Ausbreitung von Schwerewellen über der Antarktis: durch starke Winde in Bodennähe werden beim Überströmen der Gebirgsrücken auf der antarktischen Halbinsel Wellen ausgelöst, die sich in der Atmosphäre nach oben ausbreiten. Um den 11. Juni 2003 führ-

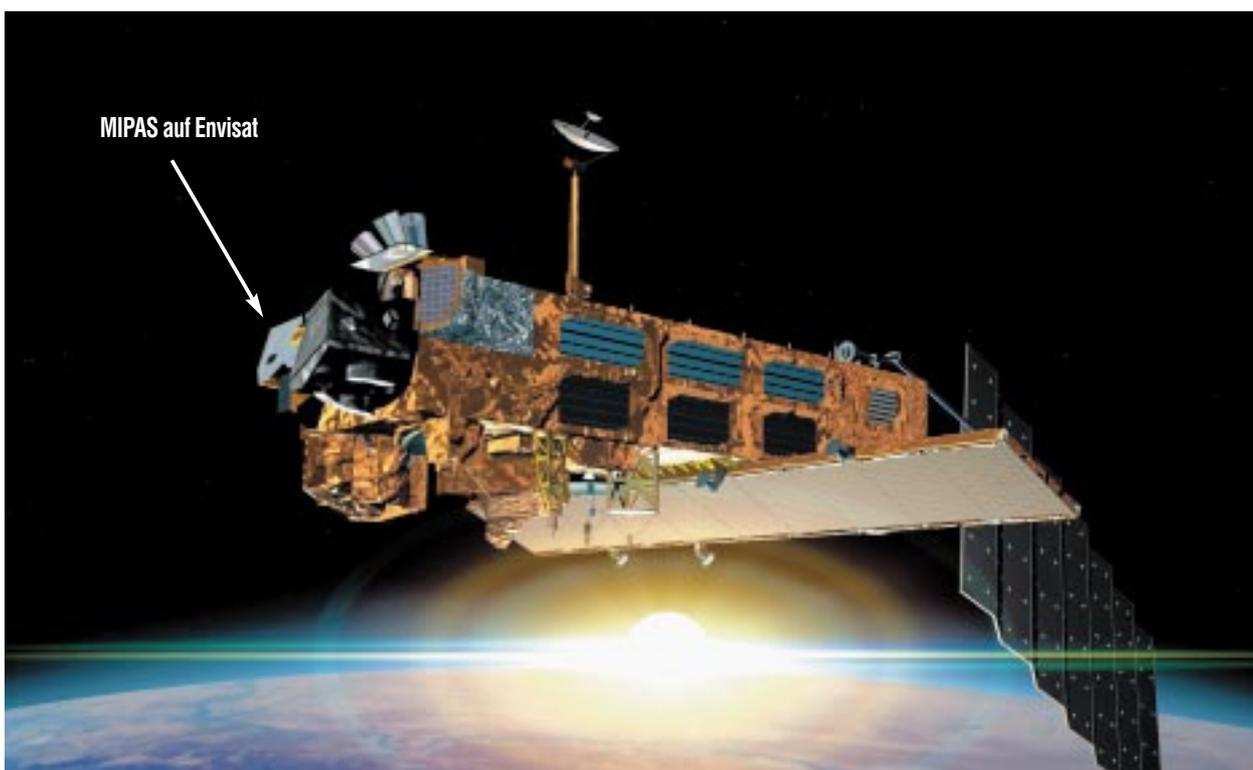


Abb. 2: MIPAS auf dem Umweltforschungssatelliten Envisat (Quelle: ESA).

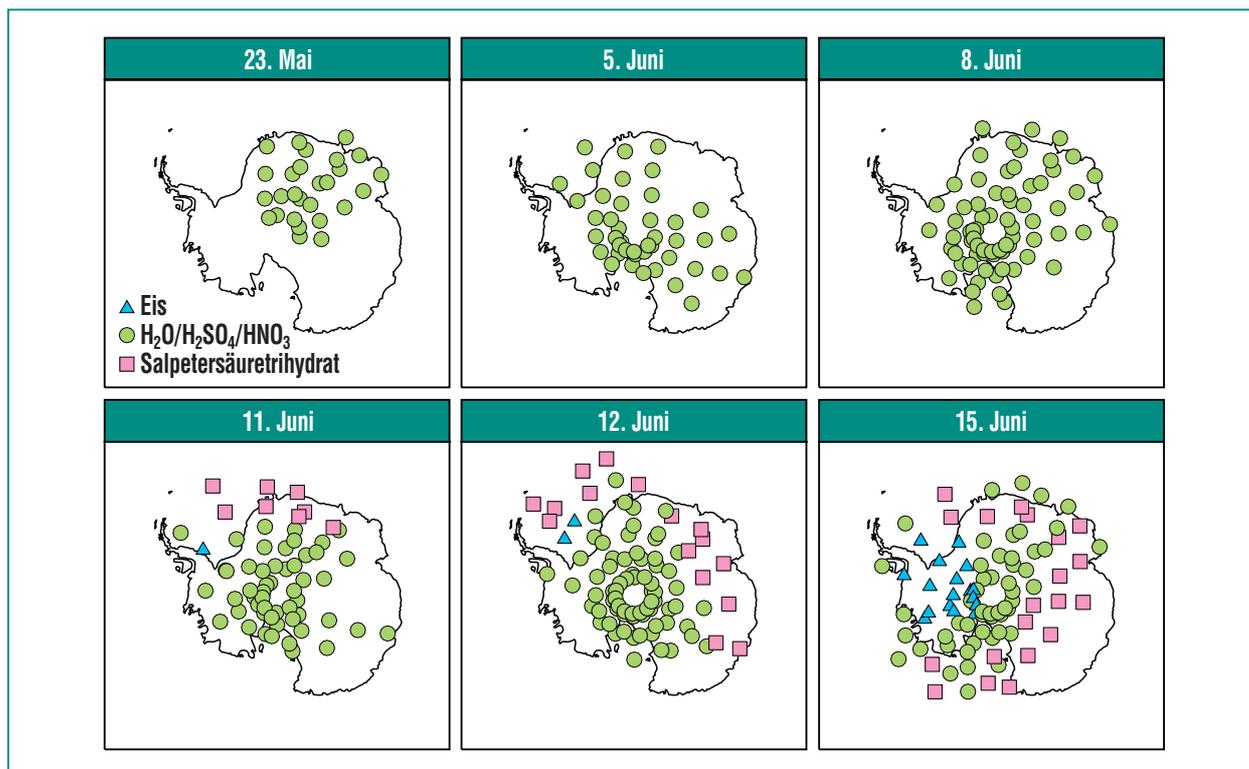


Abb. 3: MIPAS-Messungen der Zusammensetzung polarer stratosphärischer Wolken über der Antarktis 2003.

te dies zu einer Temperaturerniedrigung in der unteren Stratosphäre um bis zu 15 °C. Bei solch tiefen Temperaturen entstanden polare stratosphärische Wolken aus Wassereis, auf deren Oberfläche sich Salpetersäuretrihydrat bilden konnte. Bei Verlassen des Gebiets der Wellenstörung verdampfte das Eis

und Salpetersäuretrihydrat-Kristalle blieben übrig.

Diese Entdeckungen weisen auf eine wesentlich größere Bedeutung von Schwerewellen für die Entwicklung polarer stratosphärischer Wolken über den Polarregionen hin als bisher allgemein angenommen wurde. Sie dienen dazu,

vorhandene atmosphären-chemische Modelle zu verbessern und somit genauere Vorhersagen über die Entwicklung der Ozonschicht im 21. Jahrhundert machen zu können.

Literatur

- [1] J.C. Farman, B.G. Gardiner, J.C. Shanklin, *Nature* 315 (1985) 207-210
- [2] S. Solomon, R.R. Garcia, F.S. Rowland, D.J. Wuebbles, *Nature* 321 (1986) 755-758
- [3] O.B. Toon, P. Hamill, R.P. Turco, J. Pinto, *Geophys. Res. Lett.* 13 (1986) 1284-1287
- [4] M.A. Tolbert, O.B. Toon, *Science* 292 (2001) 61-63
- [5] H. Fischer, H. Oelhaf, *Appl. Opt.* 35 (1996) 2787-2796
- [6] M. Höpfner, B.P. Luo, P. Massoli, F. Cairo, R. Spang, M. Snels, G. Di Donfrancesco, G.P. Stiller, T. von Clarmann, H. Fischer, U. Biermann, *Atmos. Chem. Phys.* 6 (2006) 1201-1219
- [7] M. Höpfner, N. Larsen, R. Spang, B. Luo, J. Ma, P. Massoli, U. Biermann, D. Broutman, F. Cairo, S.D. Eckerman, H. Fischer, B. Knudsen, G.P. Stiller, S. Svendsen, T. von Clarmann, *Atmos. Chem. Phys.* 6 (2006) 1221-1230

Auswirkungen der Klimaänderung auf den biosphärischen N-Spuren-gasaustausch

N. Brüggemann, K. Butterbach-Bahl, R. Forkel, R. Knoche, H. Papen, W. Seiler, C. Werner, IMK

Die Biosphäre hat einen entscheidenden Einfluss auf die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und damit u. a. auch auf das Klima. Auf der anderen Seite bestimmt das Klima mit seiner Temperatur- und Niederschlagsverteilung wiederum die Vegetationsverteilung und den Gasaustausch zwischen der Biosphäre und der Atmosphäre. An diesen extrem komplexen und vielfach unverständlichen Rückkopplungsprozessen sind die gasförmigen Stickstoffverbindungen N_2O (Lachgas) und NO (Stickstoffmonoxid) beteiligt, die im Boden durch mikrobiologische Prozesse gebildet werden und wirksame Treibhausgase darstellen bzw. maßgeblich an der Bildung bodennahen Ozons beteiligt sind. Eine wichtige Quelle dieser Spurengase ist die Landwirtschaft, hier insbesondere durch

die Applikation von N-haltigen Düngern.

Die Bildung von N_2O und NO im Boden ist abhängig vom Pflanzenbestand und vom Stickstoffgehalt sowie anderen chemischen und physikalischen Parametern, insbesondere aber von der Bodenfeuchte und -temperatur, die wiederum im direkten Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge und -verteilung sowie der Lufttemperatur stehen. Änderungen des Klimas haben damit einen unmittelbaren Einfluss auf die Emissionen dieser direkten und indirekten Treibhausgase, was in einem Nachfolgeabkommen zum Kyoto-Protokoll unbedingt berücksichtigt werden muss. Aussagen über die regional unterschiedlich ausgeprägten zukünftigen Emissionen sind aber aufgrund der vor-

handenen Kenntnisdefizite nicht möglich.

Um diese Lücke zu schließen, wird durch das IMK-IFU ein international angelegtes Forschungsprogramm mit einem integrierten, ganzheitlichen Forschungsansatz durchgeführt, der intensive Prozessstudien zur Aufklärung der am Stoffaustausch zwischen Vegetation, Boden, Atmosphäre sowie Grund- und Oberflächenwasser beteiligten biologischen Prozesse, Langzeitmessungen des Biosphäre-Atmosphäre-Spuren-gasaustauschs an Dauermessstationen und die Weiterentwicklung prozessorientierter biogeochemischer Modelle zur Simulation des Biosphäre-Atmosphäre-Spuren-gasaustauschs umfasst, auf deren Basis letztendlich die großräumigen Emissionskataster erstellt werden.

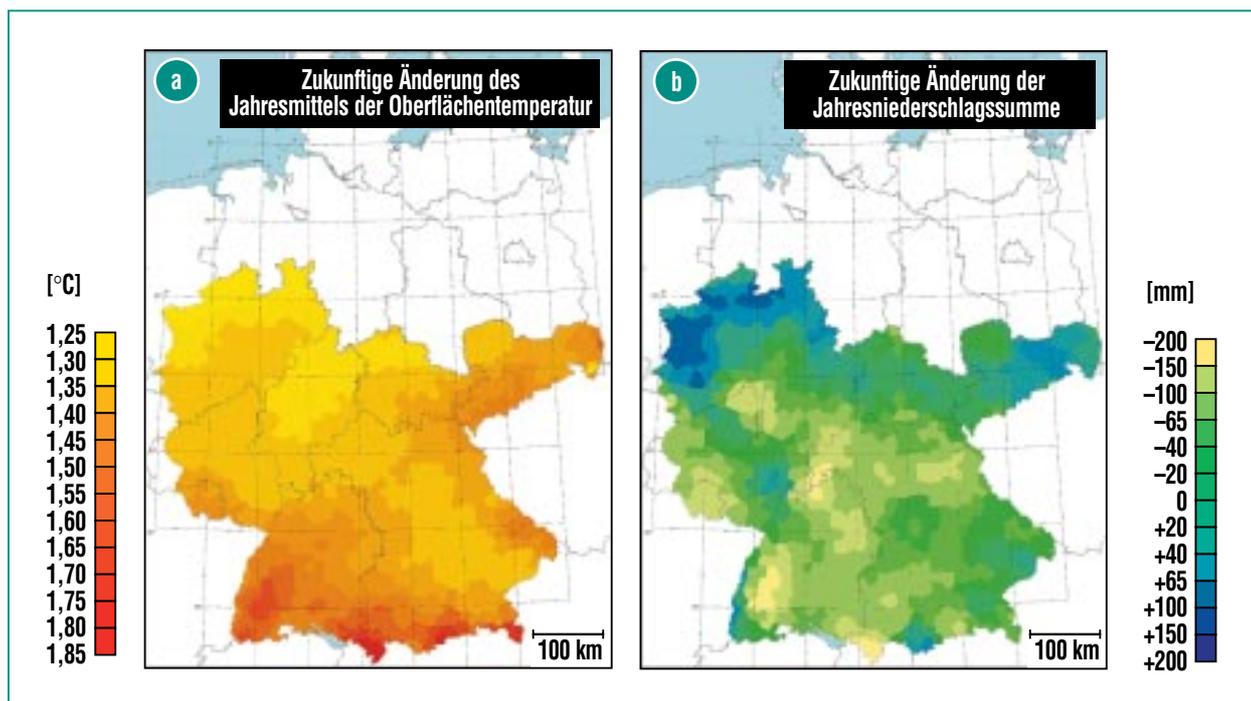


Abb. 1: Vorhergesagte zukünftige Änderung (a) des Jahresmittels der Oberflächentemperatur in °C, (b) der Jahresniederschlagssumme in mm. Dargestellt ist die Differenz zwischen den Vergleichszeiträumen 2031–2039 und 1991–1999.

Beispielhaft für diese Arbeiten sind nachfolgend die Ergebnisse einer Fallstudie wiedergegeben, in der die NO- und N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie Waldböden in Süddeutschland für den Zeitraum von 1991 bis 1999 (Jetztzeit) sowie für 2031 bis 2039 (Zukunft) berechnet wurden. Die regionale Klimaänderung zwischen diesen Zeitperioden wurde mit dem regionalen Klimamodell MCCM [1] unter Verwendung von Klimaeingangsdaten aus dem globalen Klimamodell ECHAM4 bei Nutzung des IS92a-Szenarios des IPCC berechnet (Abb. 1). Mit Hilfe der dabei erzielten Ergebnisse über die zukünftigen Temperatur- und Niederschlagsverteilungen wurden dann in einem zweiten Schritt die Emissionen von N₂O und NO mit Hilfe der biogeochemischen Modelle

DNDC für landwirtschaftliche Böden [2] und PnET-N-DNDC für Waldböden [3, 4, 5] simuliert (Abb. 2, 3).

Im Falle des NO ist aufgrund der insbesondere in den Sommermonaten ansteigenden Temperaturen mit einer signifikanten Zunahme der NO-Emissionen zu rechnen. So steigen die Jahressummen der NO-Emissionen aus Waldböden im Mittel von 1,09 kg NO-N ha⁻¹ a⁻¹ in der Jetztzeit auf 1,22 kg NO-N ha⁻¹ a⁻¹ im Zeitraum von 2031–2039 (+12,2 %). Bei den landwirtschaftlich genutzten Böden werden Anstiege von 2,05 kg NO-N ha⁻¹ a⁻¹ auf 2,26 kg NO-N ha⁻¹ a⁻¹ (+10,1 %) erwartet, wobei die höchsten Zuwachsraten in Gebieten auftreten, in denen die Temperaturen als auch die Niederschlagssumme zunehmen, und sich hierdurch die Be-

dingungen für die NO-Produktion erheblich verbessern.

Insgesamt nimmt auch die über Süddeutschland gemittelte N₂O-Emission zu, weist allerdings erhebliche regionale Differenzen auf. Die Jahresemissionen aus Waldböden steigen von 1,31 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹ auf 1,37 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹ (+4,5 %), wohingegen die N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden deutlich stärker, und zwar von 6,90 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹ auf 8,16 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹, ansteigen (+18,3 %). Im Gegensatz dazu werden in Bereichen, für die eine drastische Abnahme der Niederschläge vorhergesagt wird, die zukünftigen N₂O-Emissionen aufgrund der abnehmenden Bodenwassergehalte sinken.

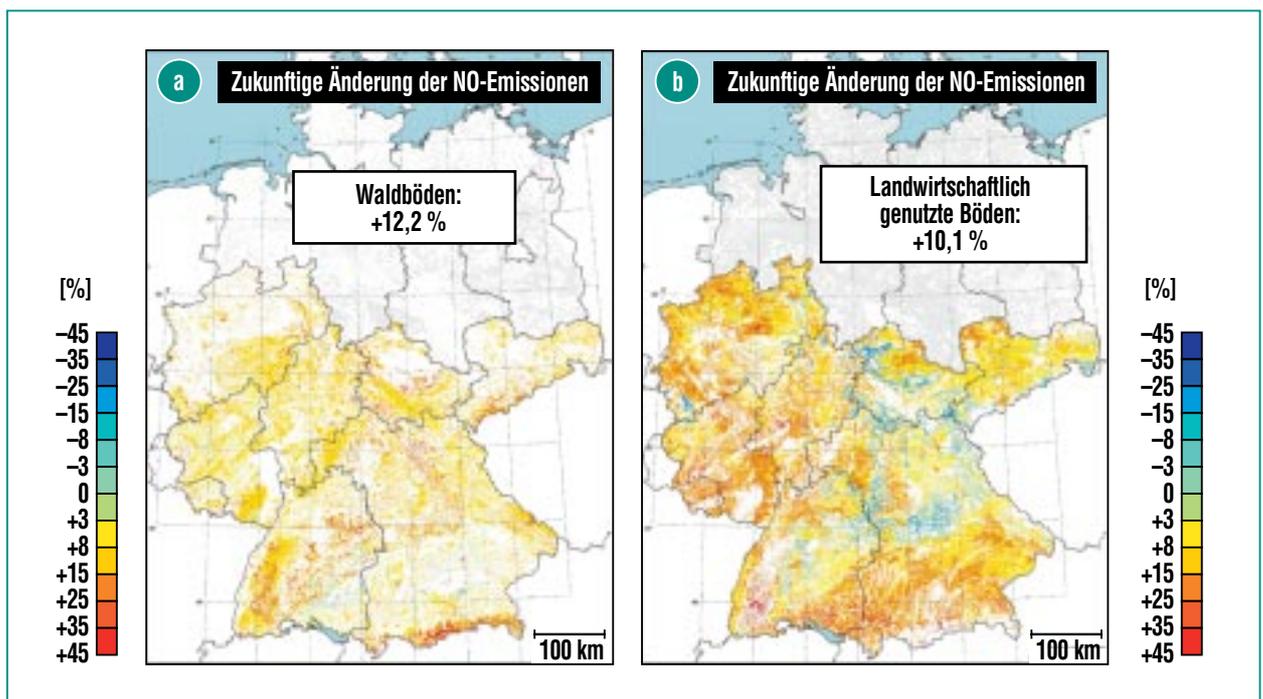


Abb. 2: Vorhergesagte zukünftige prozentuale Änderung der NO-Emissionen aus (a) Waldböden, (b) aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Dargestellt ist die Differenz zwischen den Vergleichszeiträumen 2031–2039 und 1991–1999.

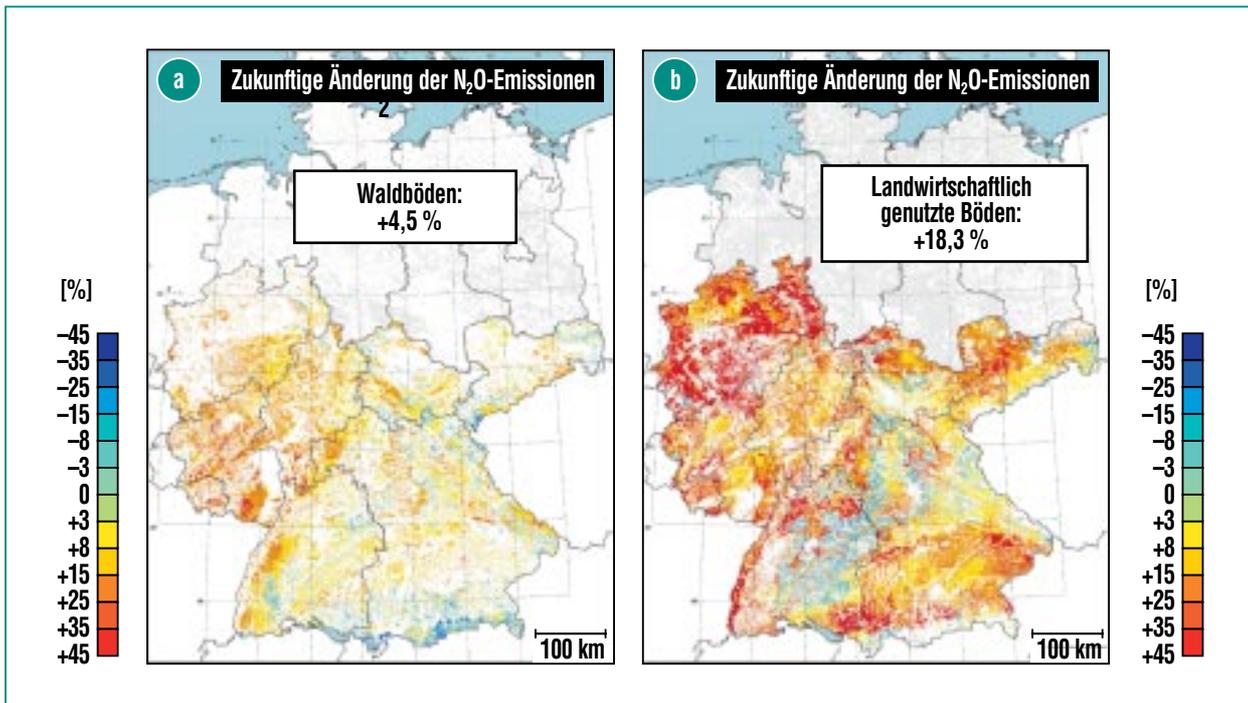


Abb. 3: Vorhergesagte zukünftige prozentuale Änderung der N₂O-Emissionen aus (a) Waldböden, (b) aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Dargestellt ist die Differenz zwischen den Vergleichszeiträumen 2031–2039 und 1991–1999.

Zusammenfassung

Die Auswirkungen der Klimaänderung in Süddeutschland auf den gasförmigen N-Austausch zwischen Böden und der Atmosphäre und die daraus resultierenden Änderungen der N₂O- und NO-Emissionen wurden mit Hilfe der

am IMK-IFU entwickelten Modelle für die nahe Zukunft (2031–2039) berechnet. Die Ergebnisse dokumentieren, dass sich die Emission der zuvor genannten, direkt und indirekt wirksamen Treibhausgase signifikant mit dem regionalen Klimawandel verändern. Die NO-Emissionen werden aus Waldbö-

den um ca. 12 % und aus landwirtschaftlich genutzten Böden um ca. 10 % zunehmen. Im Fall der N₂O-Emissionen wird mit einer Zunahme von ca. 5 % bzw. ca. 18 % gerechnet.

Literatur

- [1] G. Grell, S. Emeis, W.R. Stockwell, T. Schoenemeyer, R. Forkel, J. Michalakes, R. Knoche, W. Seidl, 2000, *Atmospheric Environment* 34, 1435–1445
- [2] C. Li, 2000, *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58, 259–276
- [3] C. Li, J. Aber, F. Stange, K. Butterbach-Bahl, H. Papen, 2000, *Journal of Geophysical Research* 105, 4369–4384
- [4] F. Stange, K. Butterbach-Bahl, H. Papen, S. Zechmeister-Boltenstern, C. Li, J. Aber, 2000, *Journal of Geophysical Research* 105, 4385–4398
- [5] K. Butterbach-Bahl, M. Kesik, P. Miehle, H. Papen, C. Li, 2004, *Plant and Soil* 260, 311–329

Kristallklar und federleicht: Eiswolken im Labor

M. Schnaiter, S. Benz, O. Möhler, R. Schön, IMK

Einleitung

Zirruswolken (von lateinisch *cirrus* = Haarlocke) bestehen ausschließlich aus feinen etwa 0,01 bis 1 mm großen Eiskristallen. Sie kommen nur in sehr großen Höhen vor, weil erst deutlich über 6 km so tiefe Temperaturen erreicht werden, dass unterkühlte Wolkentröpfchen nicht mehr existieren können. Ihren Namen tragen Zirren wegen ihres federartigen Aussehens, das auf die langsame Sinkgeschwindigkeit der winzigen Eiskristalle und Windscherungen zurückgeführt wird. Die hexagonalen Eiskristalle können durch Brechung des Sonnenlichtes eindrucksvolle optische Phänomene verursachen: stern- und bogenförmige Leuchterscheinungen, die in bestimmten Richtungen und festen Winkeln von der Sonne auf-

treten und als Halos bezeichnet werden.

Hohe Zirren sind klimawirksam, weil sie sichtbares Sonnenlicht zurückstreuen, während sie die Wärmestrahlung der Erde absorbieren (Abb. 1). Es gibt Hinweise, dass menschliche Aktivitäten, insbesondere Emissionen des Luftverkehrs die Häufigkeit der Zirrenbildung und ihre Strahlungseigenschaften verändern. Die Folgen für das Erdklima sind allerdings noch sehr unzureichend erforscht [1].

Für die Zirrenbildung sind Aerosolpartikel von entscheidender Bedeutung, denn zur Entstehung von Eiskristallen in wolkenfreier Luft müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

Das Eis-Sättigungsverhältnis S_{Eis} (= Quotient aus herrschendem Wasserdampf-Partialdruck und dem Gleichgewichts-Dampfdruck

über Eis bei der gegebenen Temperatur) muss den Wert eins übersteigen

Es müssen Lösungströpfchen oder feste Partikel vorhanden sein, auf denen sich der Wasserdampf als Eis abscheiden kann oder in denen Eiskeime spontan entstehen.

Übersättigte Bedingungen mit $S_{\text{Eis}} > 1$ entstehen, wenn feuchte Luft konvektiv oder durch Aufgleiten expandiert und sich dabei adiabatisch abkühlt. Flugzeugmessungen haben gezeigt, dass zur Zirrenbildung vorwiegend winzige Schwefelsäuretröpfchen, Wüstenstaub und Rußpartikel mit Größen unter 0,001 mm beitragen. Schwefelhaltige Gase stammen zum Teil aus natürlichen Quellen wie Vulkanen, werden aber auch von Flugzeugen emittiert, die mit schwefelhaltigem Kerosin fliegen. Dabei entstehen zugleich Rußpartikel,

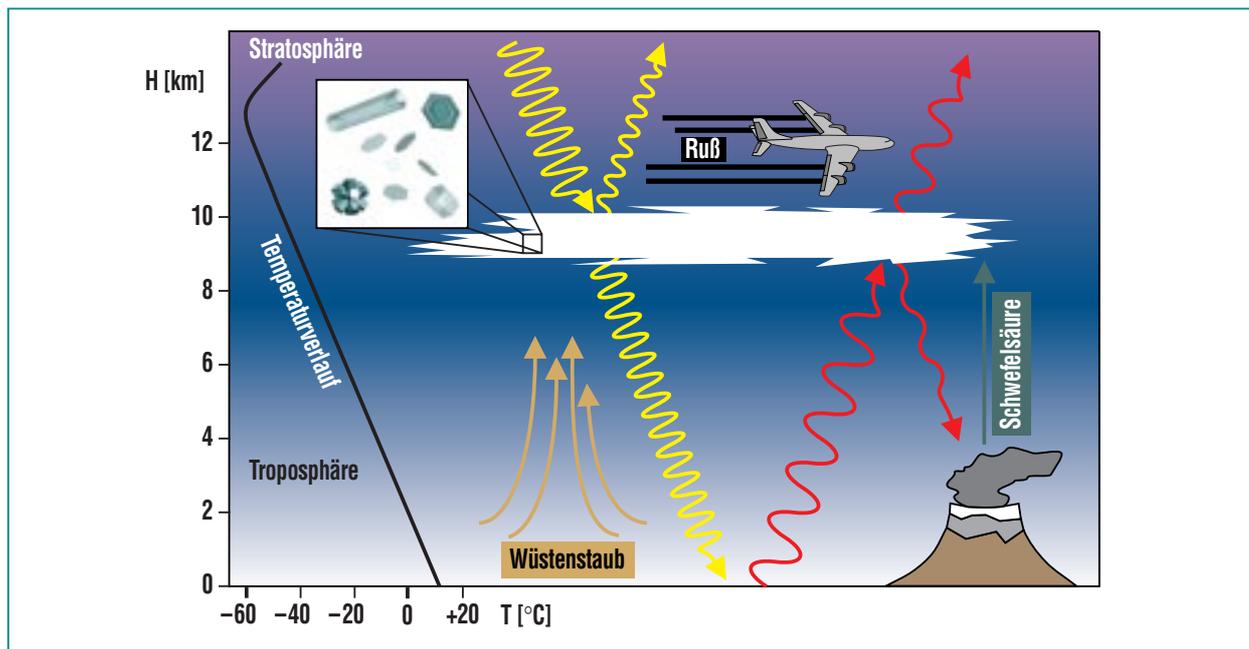


Abb. 1: Zirruswolken entstehen in der kalten oberen Troposphäre. Natürliche und vom Menschen gemachte Aerosole spielen dabei eine Schlüsselrolle und haben somit Einfluss auf die klimarelevanten Strahlungseigenschaften der Zirren.

die jedoch auch aus bodennahen Quellen stammen können, falls sie wie Wüstenstaub in große Höhen getragen werden. Der Mensch kann also die Zirrenbildung auf vielfältige Weise direkt oder indirekt beeinflussen. Ziel der hier vorgestellten Arbeiten ist ein besseres Verständnis dieser Einflüsse und deren Auswirkungen auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und damit das Klima.

Die Wolkenkammer AIDA

Mit der Wolkenkammer AIDA (Aerosol-Interaktionen und Dynamik in der Atmosphäre) des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung verfügt das Forschungszentrum Karlsruhe über eine weltweit einmalige Versuchsanlage zur Untersuchung der Bildungsprozesse und optischen Eigenschaften von Zirren [2]. In der bis auf -90 °C kühlbaren Kammer, die aus einem zylindrischen Aluminiumgefäß mit 84 m^3 Rauminhalt besteht, lassen sich die bei der Entstehung natürlicher Zirren herrschenden Temperatur- und Druckverhältnisse realitätsnah nachbilden. Eis-Sättigungsverhältnisse bis zu 2 werden dynamisch erzeugt, indem der Druck in der vorgekühlten Kammer, ähnlich wie in einem rasch aufsteigenden Luftpaket in der freien Atmosphäre, durch starkes Pumpen kontinuierlich abgesenkt wird, wodurch sich das Kammervolumen adiabatisch abkühlt.

Zum Studium der Zirrenbildung sind höchstempfindliche Nachweismethoden für die Entstehung und das Wachstum winziger Eiskristalle unerlässlich. An AIDA kommen verschiedene optische Ver-

fahren zum Einsatz, die am Institut speziell für diesen Zweck entwickelt wurden. Zum Nachweis der Eisbildung wird ausgenutzt, dass polarisiertes Laserlicht bei der Streuung an Eiskristallen selektiv depolarisiert wird, während von runden bzw. viel kleineren Aerosolpartikeln gestreutes Licht seine Polarisation beibehält. Form und Wachstum der erst wenige μm großen Eiskristalle werden mit einem für diesen Zweck entwickelten ultraschnellen Mikroskop (8 ns Belichtungszeit) untersucht. Es bildet die luftgetragenen Kristalle auf einem CCD-Chip ab (Abb. 2), mit dem während eines einzigen Experiments tausende von Bildern geschossen werden können. In einer zweiten Entwick-

lungsstufe wird das Gerät gleichzeitig die klimarelevanten Streueigenschaften der Eiskristalle winkelaufgelöst messen.

Experimente mit künstlichen Eiswolken

In einer Serie von AIDA-Messkampagnen wurden die zur Eisbildung erforderlichen kritischen Temperaturen und Sättigungsverhältnisse S_{Eis} für eine Reihe von atmosphärisch relevanten Aerosolen untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse für Schwefelsäuretröpfchen, Mischpartikel aus Ruß und Schwefelsäure (als Modell für Aerosole aus dem Flugverkehr), sowie für Wüstenstaub sind in



Abb. 2: Einige Bilder von Eiskristallen, die bei der Simulation von Zirruswolken in AIDA mit dem ultraschnellen Mikroskop aufgenommen wurden. Oben ist die typische federartige Struktur von Zirren zu erkennen, der sie ihren Namen verdanken.

Abb. 3 schematisch zusammengefasst:

So genannte homogene Eisbildung in Schwefelsäuretröpfchen erfordert im gesamten Temperaturbereich, in dem Zirren beobachtet werden, hohe Sättigungsverhältnisse S_{Eis} zwischen 1,5 und 1,7.

In Mischpartikeln aus Ruß und Schwefelsäure erfolgt heterogenes Immersionsgefrieren schon im mittleren Sättigungsbereich um 1,4.

Wüstenstäube sind besonders wirksame heterogene Eiskeime, weil sie schon bei $S_{\text{Eis}} \sim 1,1$ zur Zirrenbildung beitragen.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich folgern, dass eine Erhöhung des Anteils heterogener Eiskeime in Höhen über 6 km die Häufigkeit der Zirrusbewölkung erhöht, da niedrigere Übersättigungen früher und damit öfter erreicht werden. Außerdem ist die Konzentration heterogener Eiskeime deutlich kleiner als die der Lösungströpfchen, weshalb heterogen gebildete Zirren eine geringere Zahl, dafür aber größere Eiskristalle aufweisen. Solche durch anthropogene Einflüsse bedingte Veränderungen wirken sich direkt auf die Strahlungseigen-

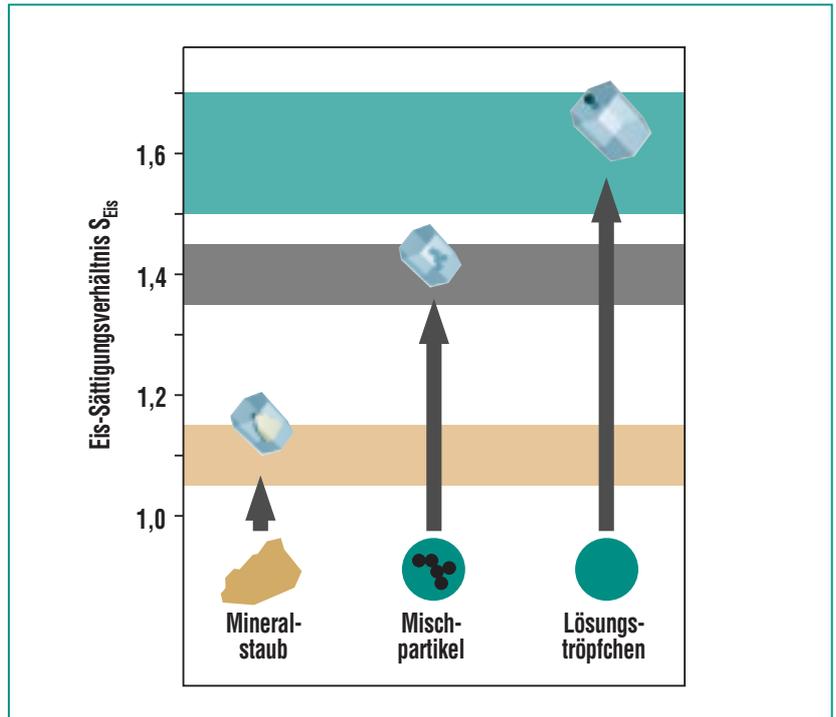


Abb. 3: In AIDA ermittelte Bereiche von Eis-Sättigungsverhältnissen, bei denen verschiedene Aerosolarten als Eiskeime aktiv werden.

schaften der Zirren aus, weil wenige große Eiskristalle weniger Sonnenlicht reflektieren als viele kleine.

Die in AIDA-Experimenten gewonnenen Erkenntnisse fließen in Klimamodelle ein, um die Vorhersagegenauigkeit von globalen Klimasimulationenmodellen zu ver-

bessern und den Effekt anthropogener Aerosolemissionen auf das Klima genauer abzuschätzen.

Literatur

- [1] U. Schumann, C. R. *Physique* 6, 549-565, 2005
- [2] O. Möhler, K. D. Beheng, *Nachrichten* 1-2, 68-72, 2003

Neue Lidar- und Radartechnologien in der Atmosphärenforschung

J. Handwerker, A. Wieser, K. D. Beheng, Ch. Kottmeier, IMK

Einleitung

Die konvektiv und mechanisch ausgelöste Turbulenz in der planetarischen Grenzschicht und in Wolken führt zu dreidimensionalen, zeitlich äußerst variablen Bewegungsformen und Feldverteilungen von Aerosolen und Hydrometeoren¹⁾. Konventionelle In-situ-Messungen, die mit instrumentierten Masten, mit Radiosonden oder von Flugzeugen aus vorgenommen werden, sind nicht in der Lage, solche Vorgänge der Atmosphäre mit hinreichender Auflösung zu erfassen. Auch Satellitensensoren sind aufgrund ihrer zu groben Vertikalauflösung und anderer Beschränkungen für so detaillierte Messungen nicht geeignet.

Diese Beobachtungslücke füllen aktive Fernerkundungsmethoden. Dabei wird ein stark gebündeltes Signal möglichst hoher Intensität in die Atmosphäre entsandt. Aus dem zurückgestreuten Signalanteil, der auf seinem Weg modifiziert wurde, lassen sich Rückschlüsse auf den Zustand der Atmosphäre gewinnen. Wellenlänge, Strahlbreite und Pulslänge sind dabei für die jeweilige Messaufgabe optimiert.

Das Forschungszentrum Karlsruhe setzt seit kurzem zwei äußerst leistungsfähige innovative Messsysteme – ein Doppler-Lidar²⁾ und ein Wolkenradar – ein, die die bisher bestehenden Messmöglichkeiten (Doppler-Sodar, C-Band Doppler Niederschlagsradar und Wind-Temperatur-Radar) entscheidend erweitern (Tab. 1). Die

neuen Geräte werden in Zukunft nach einer Erprobungsphase zu detaillierten Untersuchungen von Turbulenz, von Konvektion und Prozessen in Wolken bevorzugt in Gebieten mit komplexer Orographie eingesetzt.

Das Doppler-Lidar WindTracer

Das neue Doppler-Lidar misst als erstes kommerziell vertriebenes Gerät zeitlich hoch aufgelöst Windgeschwindigkeit und Aerosolverteilung in einem Umkreis von bis zu 10 km mit einer räumlichen Auflösung von ca. 80 m in Strahlrichtung. Dazu werden über einen 2-Achsen-Scanner IR-Lichtpulse der Wellenlänge $\lambda = 2 \mu\text{m}$ aus einem Tm:LuAG³⁾ Laser mit einer Wiederholrate von 500 Hz in die At-

	Lidar	Wolkenradar
Sender	Tm:LuAG Laser	Magnetron
Pulsdauer	425 ns	100 ns, 200 ns, 400 ns
Pulswiederholfrequenz	500 Hz	2500 Hz, 5000 Hz, 10000 Hz
Leistung (Mittel/Pulsspitze)	1 W/4,5 kW (bei 425 ns)	30 W/30 kW
Strahlbreite	7,1 cm	0,6°
Azimut-Scanbereich	0° bis 360°	0° bis 360°
Elevations-Scanbereich	-5° bis 185°	45° bis 90°
Scangeschwindigkeit	0,1°/s bis 25°/s	0,1°/s bis 6°/s
Samplingfrequenz	100 MHz	50 MHz
Datenrate	10 Hz	10 Hz
Entfernungsintervalle	100	512
Windgeschwindigkeitsmessbereich	± 20 m/s oder ± 40 m/s	± 5 m/s bis ± 20 m/s

Tab. 1: Technische Parameter der beiden hier vorgestellten Messsysteme.

¹⁾ Oberbegriff für alle aus kondensiertem Wasser bestehenden Teilchen: Wolkentropfen, Wolkeneis, Regentropfen, Hagel, Graupel.

²⁾ Lidar, Radar und Sodar sind Kunstworte, die Abkürzungen von „Light (Radiation, Sound) Detection and Ranging“ sind.

³⁾ Thulium Lutetium Aluminium Granat

mosphäre ausgesandt. Das Laserlicht wird auf seinem Weg an Aerosolteilchen, die größer als $0,5 \mu\text{m}$ sind, gestreut. Ein sehr kleiner Anteil wird zurückgestreut und kann vom Lidar im Empfangsbetrieb detektiert werden. Da die Aerosolteilchen mit dem Wind treiben, kann aus der Doppler-Frequenzverschiebung $\Delta v = 2 v_r / \lambda$ zwischen gesendetem und empfangenen Puls die Windgeschwindigkeit in Strahlrichtung (v_r) bestimmt werden. Bei einer radialen Windgeschwindigkeitskomponente von $v_r = 1 \text{ m/s}$ ergibt sich eine Frequenzverschiebung von $\Delta v \approx 1 \text{ MHz}$.

Die Ortszuordnung des rückgestreuten Signals wird aus der Differenz zwischen Sende- und Empfangszeit bei bekannter Lichtgeschwindigkeit und der Winkelstellung des Scanners berechnet. Entlang des Laserstrahls erhält man für 100 frei einstellbare Entfernungsintervalle mit einer Datenrate von 10 Hz Messwerte der radialen Windgeschwindigkeit sowie, aus der Rückstreuintensität abgeleitet, der Aerosolkonzentration.

Bei senkrechter Pulsabstrahlung lässt sich somit die Vertikalkomponente der Windgeschwindigkeit direkt messen. Zur Bestimmung des dreidimensionalen Windvektors und zur Untersuchung der Feinstruktur des Windfelds hingegen werden die Laserpulse mit Hilfe des 2-Achsen-Scanners unter verschiedenen Azimutwinkeln und Elevationen gesendet. Ein Beispiel einer Messung während einer Kampagne in Südeuropa (CSIP 2005, Convective Storm Initiation Project, http://www-fzk.imk.uni-karlsruhe.de/seite_2328.php) zeigt die große Detailschärfe der Lidarmessung (Abb. 1). Die Vertikalschnitte durch eine mit ca. 5 m/s auf den Messort heranziehende Seewindfront zu drei Zeitpunkten zeigen, dass oberhalb der Seewindfront ab ca. 100 m Höhe der Wind mit 5 m/s vom Lidar weg gerichtet ist, während er innerhalb der Seewindzone mit 5 m/s in entgegengesetzter Richtung weht. Die variable Höhe der Seewindzone wird durch die turbulenten Mischungsvorgänge infolge der Windscherung zwischen

den beiden Strömungsschichten hervorgerufen. Mit dem Doppler Lidar war es dabei möglich, die Seewindfront mehr als 20 Minuten vor Ihrer Ankunft am Lidarstandort zu detektieren – lange bevor ein am Boden stehender Beobachter sie bemerkt hätte. Diese kurzfristige Vorhersagemöglichkeit kann für windempfindliche technische Anlagen, z. B. Windenergiekonverter, zur Steuerung oder bei Vorgängen wie bei Flugzeugen in der Start- und Landephase zur Warnung genutzt werden.

Das Wolkenradar MIRA36-S

Während die Lidarpulse nur wenige Meter in eine Wolke eindringen können, weil die Dämpfung dort zu groß ist, können die elektromagnetischen Pulse des Wolkenradars MIRA36-S bei einer Wellenlänge von 8,4 mm solche Wolken durchdringen, die keine großen Niederschlagstropfen enthalten, wobei eine Reichweite von ca. 15 km erreicht wird.

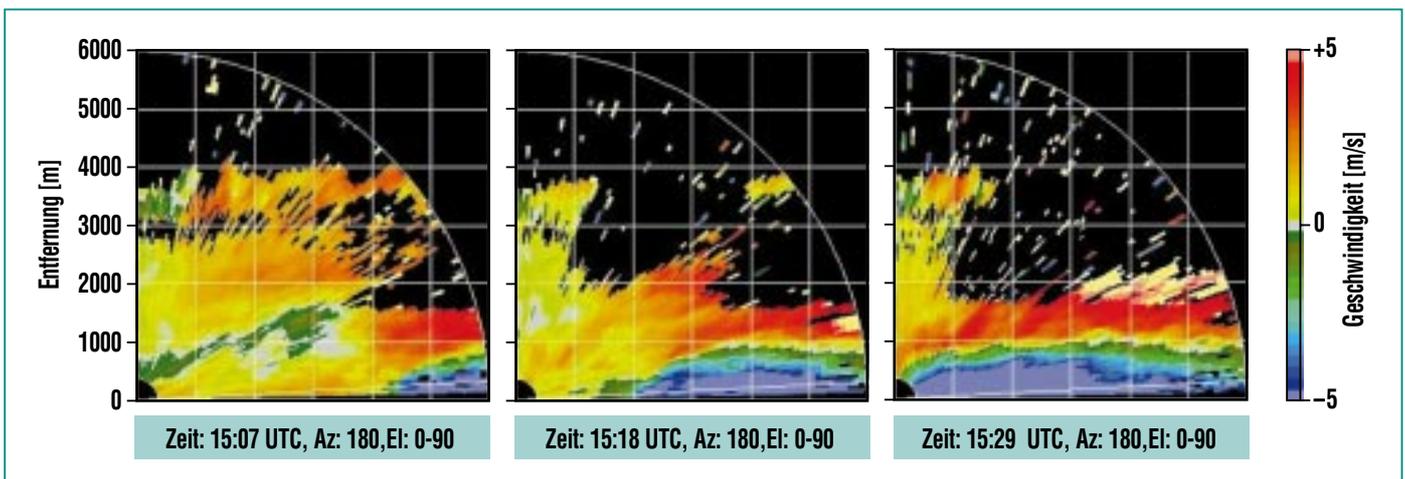


Abb. 1: Vertikale Reflektivitätsverteilung, gemessen mit dem Lidar: Heranziehende Seewindfront für drei aufeinanderfolgende Zeitpunkte.

Der 2-Achsen-Scanner des Wolkenradars überdeckt den gesamten Azimutbereich und den Höhenbereich von 45° bis zum Zenit. Die bei Wolkenradargeräten bisher kaum realisierte Scaneinrichtung erlaubt Horizontal- und Vertikal-messungen durch Wolken sowie Volumenscans.

Ein Messbeispiel eines komplexen Wolkenaufbaus mit einem Schnitt in einer Vertikalebene (Abb. 2) wurde am 3. 12. 2005, 16:00 Uhr, in Lindenberg bei Berlin aufgenommen. Die Reflektivität (Abb. 2, oben) der Wolke als Farbcodegrafik zeigt, dass zwischen etwa 1,5 km Höhe und gut 6 km Höhe die Reflektivität der Wolke nur schwach variiert. Darüber nimmt die Reflektivität bis zum Oberrand kontinuierlich ab, während unterhalb von 2 km Höhe die hohe Reflektivitäten durch kleine Hydrometeore (Nieselregen) zu erklären sind.

In rund 1 km Höhe ist ein sogenanntes helles Band mit Reflektivitäten von ca. 20 dB_Z zu erkennen. Hier handelt es sich um die Schmelzzone, in der gefrorene Wolken- und Niederschlagsteilchen in den flüssigen Zustand übergehen. Diese Zone ist auch anhand des erhöhten LDR-Wertes (Abb. 2, unten) deutlich zu erkennen. Das lineare Depolarisationsverhältnis (LDR) ist ein Maß für die Kugelform der Hydrometeore: Kugelförmige Tropfen und Eispartikel haben ein sehr niedriges LDR (ca. -30 dB), während z. B. Eiskristalle in Säulchenform ein relativ hohes LDR erreichen (ca. -10 dB). Klar erkennbar ist, dass oberhalb von gut 4 km offensichtlich eher asphärische Wolkenteilchen vor-

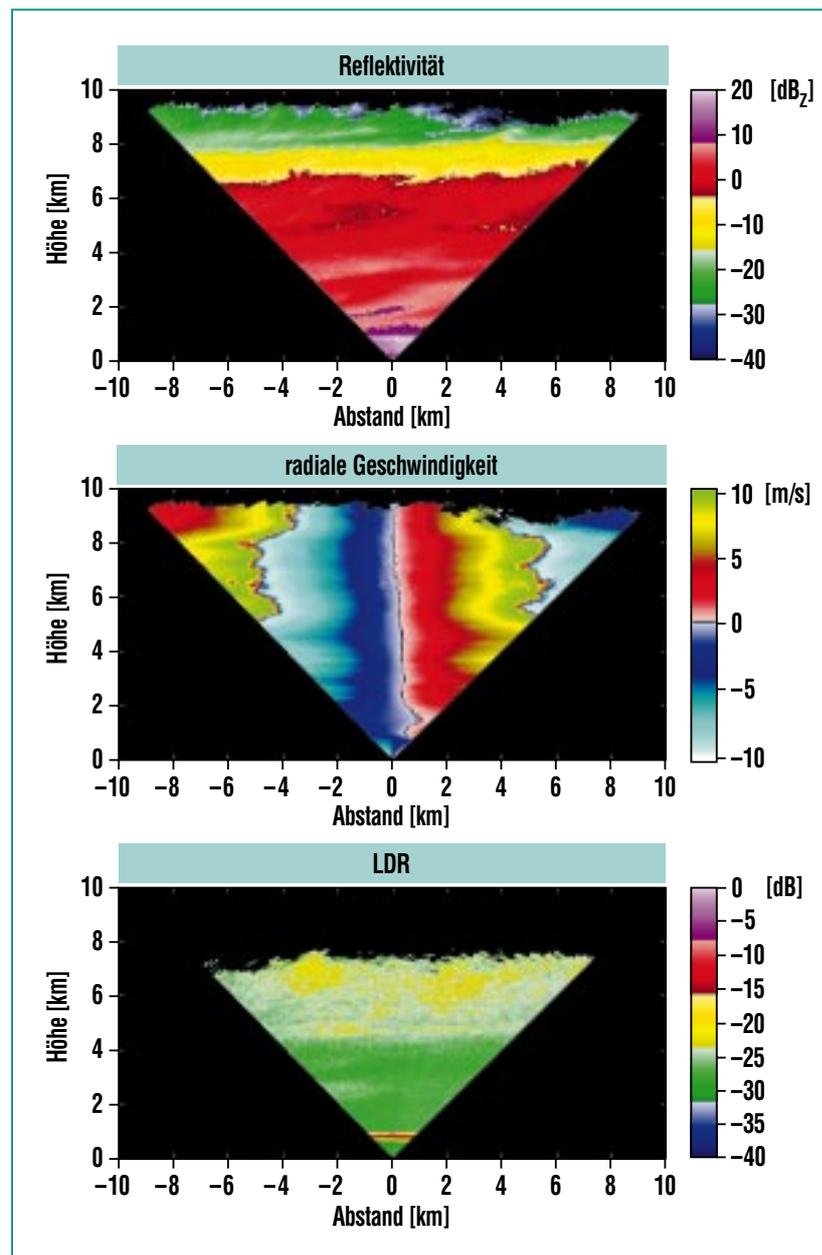


Abb. 2: Reflektivität (oben), Dopplergeschwindigkeit (mitte) und LDR von einer Wolkenradarmessung.

herrschen, während sie darunter eher sphärisch erscheinen.

Die Geschwindigkeitskomponente der Wolkenteilchen auf das Radar zu (Abb. 2, mittig) zeigt senkrecht über dem Radar das Sedimentieren der Wolkenteilchen

(blau). In allen anderen Richtungen wird die Fallgeschwindigkeit überlagert von der Horizontalgeschwindigkeit der Teilchen. Zwischen 1 km und 2 km Höhe herrschen offensichtlich eher geringe horizontale Windgeschwindigkeiten. Der abrupte Übergang von

hellblauen zu hellgrünen Farben deutet auf eine Faltung der Windgeschwindigkeitswerte hin. Für Bereiche außerhalb dieser Faltungen müssen Geschwindigkeiten um 20 m/s korrigiert werden.

Zusammenfassung

Die jetzt verfügbare Kombination von Doppler-Lidar, Wolkenradar und Niederschlagsradar ermöglicht eine hervorragende Erfassung der Niederschlagsentstehung, insbesondere im Falle hochreichender Konvektion. Während das Lidar in der Lage ist, das Windfeld außerhalb von Wolken und während der Entstehung von Wolken zu vermessen, liefert das Wolkenradar Aufschluss über die Vorgänge in Wolken. Den ausfallenden Niederschlag kann man dann mit dem Niederschlagsradar beobachten. Mithilfe der drei Fernerkundungsgeräte (Szenario Abb. 3) erhält man folglich erstmals ein vollständiges Bild der Vorgänge im Vorfeld und während konvektiver Niederschlagsereignisse.

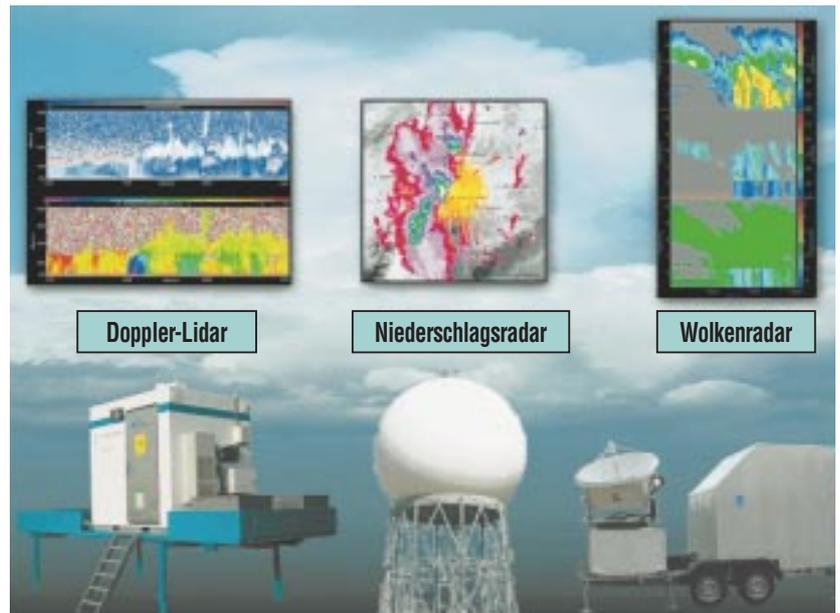


Abb. 3: Gemeinsam mit den Niederschlagsradar bieten die hier vorgestellten Messgeräte optimale Beobachtungsmöglichkeiten von konvektiven Niederschlagsereignissen.

Ein umfassender Einsatz der drei Geräte gemeinsam mit vielen anderen direkten und indirekten Messverfahren ist bei dem internationalen Großexperiment COPS (Convective and Orographically induced Precipitation Study, [\[www.uni-hohenheim.de/spp-iop/\]\(http://www.uni-hohenheim.de/spp-iop/\)\), das vom FZK maßgeblich getragen wird, im Jahr 2007 in Süddeutschland und Frankreich geplant.](http://</p></div><div data-bbox=)

Einführung Forschungsbereich Schlüsseltechnologien

M. Popp, Vorstandsvorsitzender 1991–2006

Neugier

Es gibt drei Motivationen für wissenschaftliche Forschung. Die älteste und stärkste ist wahrscheinlich die schlichte Neugier, der Wille zu verstehen, wie die Welt um uns herum funktioniert und aufgebaut ist. Diese Motivation ist besonders stark, wenn nicht ausschließlich, in unserem Forschungsthema Astroteilchenphysik, klingt aber auch in vielen anderen Themen immer wieder mit und ist oft genug der eigentliche Motor der Begeisterung, die unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bei ihrer Arbeit empfinden.

Problemlösung

Ein ganz wichtiges Motiv ist die Lösung von großen Zukunftsproblemen der Menschheit, von denen wir uns vor allen Dingen dem Thema Energie widmen. Verknappung der Rohstoffressourcen, wachsender Energiehunger aufstrebender Industrienationen in Asien, Belastung des Klimas durch Verbrennungsprodukte der immer noch bei

weitem dominierenden fossilen Energiequellen, die derzeitige Ablehnung der Kernenergie in Deutschland: Alles dies sind Probleme, die eine nachhaltige Entwicklung einer ökonomisch und ökologisch vertretbaren Energieversorgung in Deutschland und Europa erheblich erschweren und einen enormen Bedarf an Innovationen auslösen. Die Energieforschung ist ein sehr schwieriges Thema. Nur wenige wirklich neue innovative Ideen sind in den letzten Jahrzehnten hinzugekommen. Fast alle Themen der Energieforschung sind in der Öffentlichkeit entweder mit übertriebenen Sorgen oder mit unrealistischen Erwartungen verbunden. Aber die Bedeutung des Zukunftsproblems Energieversorgung rechtfertigt es, dass das Forschungszentrum ihm den größten Teil seiner Kapazität widmet.

Neue Technologien für die Zukunft

Schließlich gibt es noch die Motivation, Chancen zu eröffnen für neue Handlungsmöglichkeiten durch Vor-

stoß in neue wissenschaftliche Dimensionen. Dafür steht im Augenblick die Nanotechnologie. Sie ist deshalb vielleicht die wichtigste Schlüsseltechnologie für die Zukunft, obwohl oder gerade weil es heute noch nicht möglich ist vorherzusagen, wo ihre wichtigsten Anwendungsfelder liegen werden. In den acht Jahren, in denen das Forschungszentrum diesen herausragend gut beurteilten Schwerpunkt aufgebaut hat, hat sich jedenfalls die Ausrichtung auf mögliche Anwendungsfelder sehr häufig und immer wieder verändert. Dieses Gebiet ist besonders faszinierend durch die völlig neuartigen Möglichkeiten, die es den Wissenschaftlern heute erlaubt, neue Kapitel der Optik, neue Familien von Werkstoffen, neue Wege der Informationsverarbeitung und vielleicht auch neue Lösungen medizinischer Probleme zu finden. Auf dem Weg in diesen neue Nanowelten wird das Forschungszentrum Karlsruhe auch seine Möglichkeit als Großforschungseinrichtung nutzen, die neuen Erkenntnisse auch selbst in die technische Dimension voranzutreiben, um damit rascher



Abb.1: Mit dem Pierre-Auger-Observatorium in der argentinischen Pampa untersucht eine internationale Kollaboration die höchstenergetische Komponente der kosmischen Strahlung.

Anwendungspotenziale der neuen Erkenntnisse zu erschließen. Ein wichtiger Schritt in diese Richtung ist die Karlsruher Nano-Micro Facility, die sämtliche Fähigkeiten des Zentrums und der Universität Karlsruhe in der Herstellung und Charakterisierung von Nano- und Mikrostrukturen bündeln wird. Karlsruhe wird dadurch ein Zentrum, in dem in einer sonst kaum irgendwo zu findenden Vollständigkeit und Vielfalt alle diese Instrumente und Fähigkeiten für die moderne Nano- und Mikrotechnik vorhanden sind, professionell betrieben werden und verstärkt auch externen Nutzern aus Wissenschaft und Wirtschaft zugänglich gemacht werden sollen. Ein immer wichtiger werdendes Element in diesen Konzepten ist unsere Synchrotronstrahlungsquelle ANKA, die dem Standort Karlsruhe deshalb besondere Durchschlagskraft verleiht.

Die Arbeiten zur Nano- und Mikrotechnologie im Forschungsbereich Schlüsseltechnologien werden als weiteres wichtiges Feld ergänzt

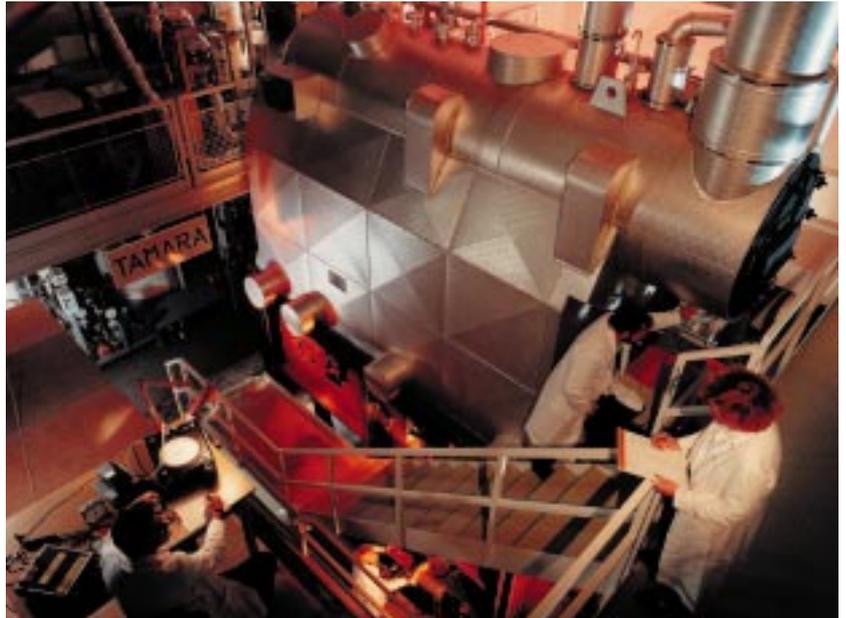


Abb. 2: Die Versuchsanlage TAMARA zur thermischen Behandlung von Hausmüll war das erste Großgerät der Umweltforschung im Forschungszentrum Karlsruhe.

durch das wissenschaftliche Rechnen, wobei sich Karlsruhe auf das Grid-Computing konzentriert. Damit realisiert das Forschungszentrum so etwas wie das zweite World Wide Web, denn es geht hierbei vor allen Dingen um die weltweite

Vernetzung von Großrechnern untereinander, um damit Rechenleistungen besser auszunutzen und vor allen Dingen große verteilte Datenmengen effizienter bearbeiten zu können. Damit werden vor allem Probleme im Bereich der Elementarteilchenphysik, der modernen Biologie und der Klimaforschung besser lösbar als in der Vergangenheit. Es ist aber auch sehr wahrscheinlich, dass Grid – ähnlich wie andere Innovationen wie zum Beispiel das Web selbst, das zunächst für eine rein wissenschaftsinterne Anwendung entwickelt wurde – große Auswirkungen auch in die Wirtschaft und Privatsphäre haben wird.

In all diesen Schlüsseltechnologien wird das Forschungszentrum seine Position noch weiter ausbauen und stets zu dem engsten Kreis der Spitzenforschungseinrichtungen der Welt gehören.



Abb. 3: Die Synchrotronstrahlungsquelle ANKA ist das zentrale Instrument der Karlsruher Nano-Microfacility KNMF.

Elektronischer Transport durch Nanostrukturen

H. v. Löhneysen, IFP und Universität Karlsruhe; D. Beckmann, INT;
M. M. Kappes, R. Krupke, INT und Universität Karlsruhe; M. Mayor, INT und Universität Basel;
H. B. Weber, INT und Universität Erlangen-Nürnberg

Für die elektronische Leitung in nanostrukturierten Systemen spielen drei allseits bekannte Tatsachen eine wesentliche Rolle: (1) die Ladung der Elektronen ist quantisiert, $e = 1,6 \times 10^{-19}$ As, (2) Elektronen können als Materiewellen, ähnlich wie Lichtwellen, miteinander interferieren, (3) Elektronen wechselwirken miteinander aufgrund ihrer negativen Ladung und sind über das Pauli-Prinzip – zwei Elektronen können nicht den gleichen Zustand besetzen, der in allen Quantenzahlen übereinstimmt – miteinander korreliert. Obwohl diese Tatsachen seit Beginn der Quantenmechanik bekannt sind, ist erst in den letzten 15 Jahren in weltumspannenden Forschungsaktivitäten gezeigt worden, dass hierdurch eine Vielzahl neuartiger Eigenschaften in nanoskaligen elektrischen Stromkreisen hervorgerufen werden, die in makroskopischen Metallen nicht auftreten. Als Beispiele seien nur genannt: Coulomb-Blockade, die zum Einzelelektronentransistor führt, Quanteninterferenzen von Elektronen sowie neue Typen von Anregungen in eindimensionalen Drähten.

Qualitativ neues Verhalten wird beobachtet, wenn der Strom durch einzelne Moleküle fließt. Hier muss die komplexe Wechselwirkung des Moleküls mit seiner Umgebung und der starke Einfluss der Art der chemischen Bindung an die metallischen Kontakte berücksichtigt werden. Weltweit werden Kohlenstoff-Nanoröhren besonders intensiv untersucht. Der eindimensionale hybride Charakter von Kohlenstoff-Nanoröhren – festkörperähnlich entlang der Röhrenachse mit Längen bis zu vielen Mikrome-

tern und molekülähnlich im Querschnitt mit Durchmessern von wenigen Nanometern – ist ein faszinierendes Beispiel für die Fragestellungen, die auf molekularer Ebene wichtig sind, und bietet gleichzeitig eine Vielzahl möglicher Anwendungen.

Das INT – und zu einem kleineren Teil auch das IFP – arbeiten in diesem wichtigen Bereich der Nanotechnologie, um die Vielfalt der Effekte des elektronischen Transports durch Nanostrukturen zu verstehen. Die starke gegenseitige Abhängigkeit der Phänomene erfordert einen Forschungsansatz, in den die Kenntnisse von Physikern, Chemikern und Materialwissenschaftlern sowie von theoretischen und experimentellen Ar-

beitsgruppen eingebracht werden. Dabei werden neben einzelnen organischen Molekülen und Kohlenstoff-Nanoröhren auch halbleitende anorganische Cluster und metallische Nanostrukturen untersucht. Aus den vielen Arbeiten am INT will dieser Artikel einige wenige Beispiele bringen: Stromtransport durch einzelne Moleküle, Separation von metallischen und halbleitenden Kohlenstoff-Nanoröhren sowie nichtlokaler Elektronentransport durch Nanokontakte zwischen einem Supraleiter und einem Ferromagnet. Die beiden erstgenannten Beispiele spielen auch eine wichtige Rolle für eine mögliche zukünftige molekulare Elektronik.

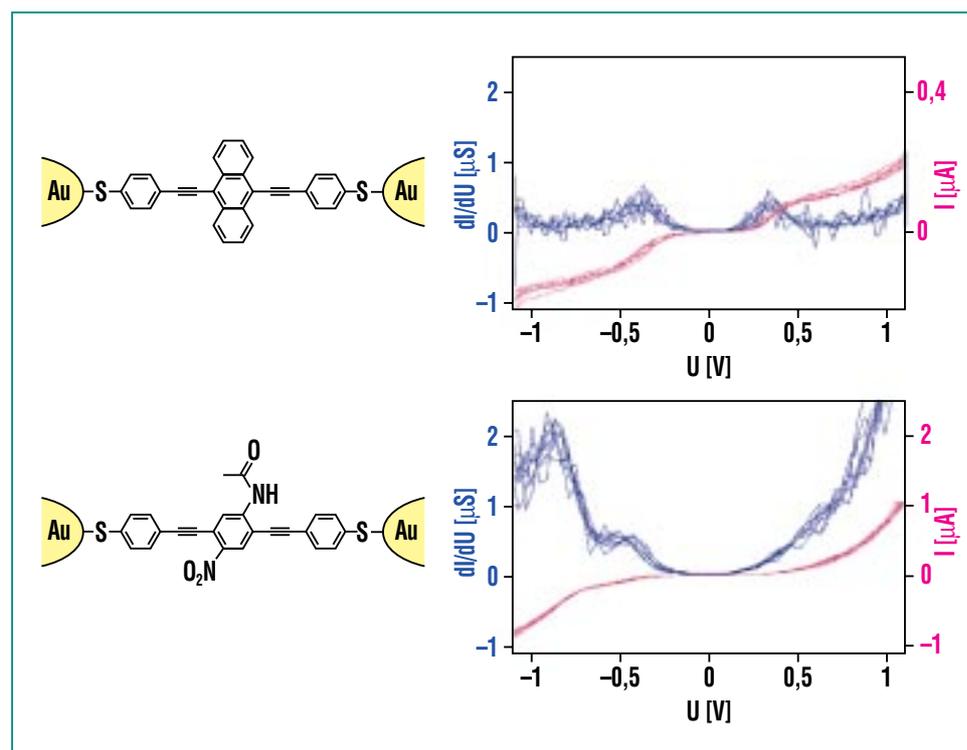


Abb. 1: Links: Schematische Darstellung der Bindung eines symmetrischen (oben) und asymmetrischen (unten) π -konjugierten Moleküls an Goldelektroden über eine S-Au-Bindung. Rechts: Strom(I)-Spannungs(U)-Kennlinien (rot) und differentieller Leitwert dI/dU (blau) der entsprechenden Konfiguration.

Einzelne Moleküle lassen sich mechanisch kontrolliert zwischen metallischen Elektroden kontaktieren (sog. „Bruchkontakte“) [1]. Dabei wird eine freitragende Nanobrücke aus Metall, z. B. aus Gold (Länge einige Mikrometer, Querschnitt etwa $100 \times 50 \text{ nm}^2$), mittels Elektronenstrahlolithographie auf ein biegsames Substrat aufgebracht. Bei kontrollierter Durchbiegung des Substrats mit Hilfe einer kleinen Mechanik reißt die Brücke und öffnet sich zunehmend bei weiterer Durchbiegung. Bei Rücknahme der Durchbiegung schließt sich die Brücke wieder. Zum Kontaktieren von π -konjugierten Molekülen der Länge von etwa 2 nm, wie in Abb. 1 links wiedergegeben, wird die Brücke sehr weit (ca. 10 nm) geöffnet und dann ein Tropfen stark verdünnter Moleküllösung aufgebracht. Die Moleküle gehen an einem Ende aufgrund der Thiol-Endgruppen eine stabile Schwefel-Gold-Bindung mit den Kontakten ein. Dann wird die überschüssige Lösung durch Abpumpen entfernt. Allmähliches Schließen der Brücke unter Anlegen einer festen Spannung führt zu einer Zunahme des (zunächst exponentiell kleinen) Stroms, bis ein relativ stabiler Stromwert erreicht wird. In dieser Position lässt sich die Strom(I)-Spannungs(U)-Kennlinie (Abb. 1 rechts, rote Kurven) mehrere Male reproduzierbar durchfahren. Auch der differenzielle Leitwert dI/dU (blaue Kurven) ist reproduzierbar. Offenbar bilden Moleküle nun einen elektrischen Pfad zwischen den Elektroden. Das wesentliche Ergebnis dieser Untersuchungen [2] ist der Unterschied der Kennlinientypen: Für das Molekül, das bezüglich einer Spiegelebene senkrecht zur Molekülebene

symmetrisch ist, beobachtet man symmetrische Kennlinien; für ein aufgrund eines elektrischen Dipolmoments längs der Molekülachse asymmetrisches Molekül beobachtet man asymmetrische Kennlinien. Diese Untersuchung legt nahe, dass nur ein einzelnes oder allenfalls wenige Moleküle den Kontakt bilden. Bei Absenkung der Temperatur auf 30 K wer-

den die Strukturen deutlich schärfer [3]. Gemeinsam mit den Theoretikern am INT wird versucht, den genauen Verlauf der I(U)-Kennlinien zu modellieren [4,5].

Schon vor vielen Jahren wurde vorgeschlagen, einzelne Moleküle auch als Dioden zu verwenden [6]. Erst kürzlich gelang am INT ein wichtiger Schritt in diese Richtung [7]. Mit dem in Abb. 2 dargestell-

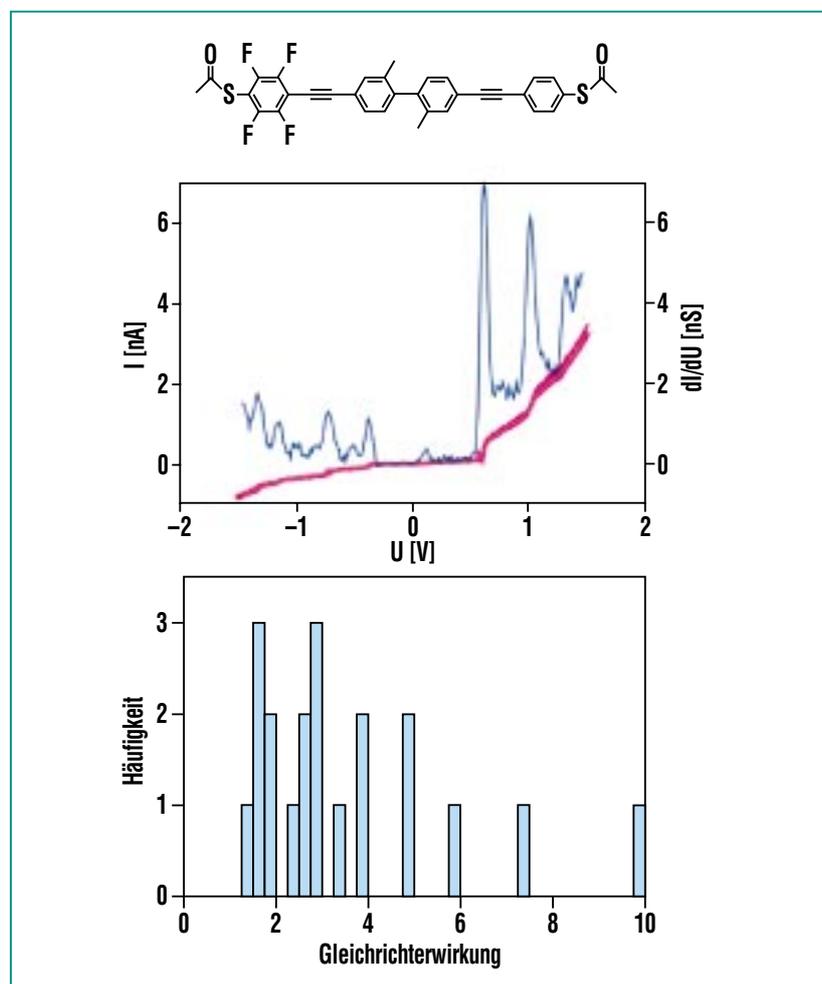


Abb. 2: Oben: Molekül für eine molekulare Diode mit Elektronendonator (linke Hälfte) und Akzeptor (rechte Hälfte), die durch eine Barriere (gegeneinander verkürzte Phenylringe) elektronisch getrennt sind. Mitte: Strom(I)-Spannungs(U)-Kennlinie (rot) und differenzieller Leitwert (blau). Man erkennt eine deutliche Gleichrichterwirkung (stärkerer Strom bei positiver Spannungsrichtung). Unten: Histogramm der Gleichrichterwirkung.

ten Molekül konnte eine Gleichrichterwirkung demonstriert werden. Dabei wirkt der Phenylring mit den stark elektronegativen Fluoratomen als Elektronendonator, der protonierte Phenylring als Akzeptor. Durch eine Verkippung der π -Elektronenebene in den beiden Hälften des Moleküls gegeneinander erhält man eine Barriere dazwischen. Die I(U)-Messungen (Abb. 2), die bei 30 K ausgeführt wurden, zeigen eine deutliche Asymmetrie mit entsprechender Gleichrichterwirkung. Diese fehlt fast vollständig in Kontrollexperimenten, bei denen beiderseits fluorierte oder beiderseits protonierte symmetrische Moleküle untersucht wurden.

Kohlenstoff-Nanoröhren stellen einen weiteren wichtigen Teil der Forschung zur molekularen Elektronik dar. An diesen eindimensionalen molekularen Nanostrukturen werden neben einer Reihe von interessanten fundamentalen Fragestellungen zum Ladungstransport auch die damit verbundenen Anwendungspotenziale für eine zukünftige nanoskalige Elektronik untersucht. Interessanterweise kommen Kohlenstoff-Nanoröhren aufgrund eines quantenphysikalischen Effektes sowohl in metallischen als auch halbleitenden Modifikationen vor, wobei sich für viele Anwendungen entweder nur der metallische oder nur der halbleitende Röhrentyp eignet. Da beide Röhrentypen unabhängig vom Produktionsverfahren stets als Gemisch vorliegen, stellt die Entwicklung eines Trennverfahrens ein wichtiges Forschungsziel dar [8]. Vor kurzem konnte am INT nun erstmals ein Verfahren vorgestellt werden, mit dem sich metallische

von halbleitenden Kohlenstoff-Nanoröhren mittels Dielektrophorese trennen lassen [9]. Das Konzept beruht auf den unterschiedlichen Polarisierbarkeiten metallischer und halbleitender Röhren: Bringt man eine ladungsneutrale Kohlenstoff-Nanoröhre (genauer: eine einwandige Röhre) in ein elektrisches Feld, so werden Ladungen entlang der Röhrenachse verschoben und es bildet sich ein elektrischer Dipol aus. Dieser feldinduzierte Dipol wechselwirkt seiner-

seits mit dem äußeren Feld und führt zunächst zu einer Ausrichtung der Nanoröhre entlang der elektrischen Feldlinien. Ist das elektrische Feld stark inhomogen, so bewegt sich die ausgerichtete Nanoröhre entlang des Feldgradienten in Richtung zunehmender Feldstärke. In einem stark polarisierbaren Medium, etwa in wässriger Tensidlösung, kann sich die Bewegungsrichtung sogar umkehren, falls das Medium stärker polarisierbar ist als die Röhre. Auf-

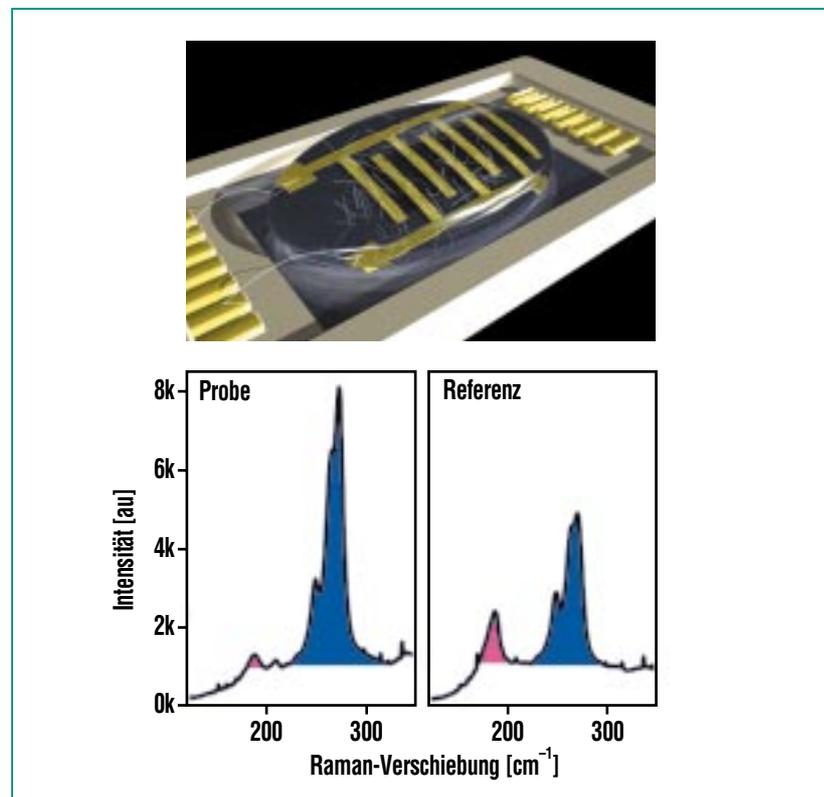


Abb. 3: Oben: Schema des experimentellen Aufbaus: Ein Tropfen Lösungsmittel, der einwandige Kohlenstoff-Nanoröhren in einer Suspension enthält, wird auf eine Elektrodenstruktur aus Gold aufgebracht. Durch Dielektrophorese werden unter geeigneten Bedingungen nur metallische Röhren abgeschieden. Unten: Raman-Spektren von mittels Dielektrophorese abgeschiedenen Nanoröhren (links) und Vergleichsprobe ohne Dielektrophorese (rechts). Die starke Anreicherung von metallischen Nanoröhren (blau) im Vergleich zu halbleitenden Röhren (rot) bei der mit Dielektrophorese abgeschiedenen Probe ist deutlich zu erkennen.

grund dieses Sachverhalts und der unterschiedlichen Polarisierbarkeiten von metallischen und halbleitenden Nanoröhren bewegen sich die beiden Röhrentypen in entgegengesetzte Richtungen und werden dadurch räumlich voneinander getrennt. Der Nachweis der Trennung erfolgte mittels Raman-Spektroskopie (Abb. 3). Mittlerweile ist es gelungen, die Ausbeute des Trennverfahrens um drei Größenordnungen zu steigern und erstmals dünne Filme aus metallischen Kohlenstoff-Nanoröhren herzustellen [10] – eine Entwicklung, die Kohlenstoff-Nanoröhren der Anwendung ein Stück näher bringen.

Eine der faszinierendsten Implikationen der Quantenmechanik ist das Auftreten nichtlokaler Korrelationen zwischen mehreren Teilchen, die Verschränkung. Obwohl dies schon sehr früh bekannt war und im Zusammenhang mit der Interpretation der Quantenmechanik kontrovers diskutiert wurde (Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon), ist erst in den 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts der zweifelsfreie Nachweis der Verschränkung durch Experimente an Photonenpaaren gelungen. Heute dienen verschränkte Teilchenpaar-

re als Ressourcen für die Quanteninformationsverarbeitung. Während in der Quantenoptik die Erzeugung verschränkter Photonenpaare und deren Eigenschaften inzwischen gut erforscht sind, fehlen vergleichbare Experimente für Elektronenpaare in Festkörpern. Am INT ist nun der Nachweis eines Mechanismus zur Erzeugung räumlich getrennter verschränkter Elektronenpaare, der nichtlokalen Andreev-Reflexion, gelungen [11] (siehe Abb. 4). Dabei wird ausgenutzt, dass Elektronen in Supraleitern zu Cooper-Paaren gebunden sind, die bereits verschränkte Zustände darstellen. Um diese nutzbar zu machen, müssen die beiden Elektronen eines Paares räumlich getrennt werden. Dazu werden zwei ferromagnetische Nanokontakte an einen Supraleiter angebracht, deren Abstand zueinander geringer ist als die Kohärenzlänge des Supraleiters, d. h. die räumliche Ausdehnung der Cooper-Paare. Über die Magnetisierung der Ferromagneten (lange Pfeile in Abb. 4, hier für antiparallele Magnetisierung gezeigt) können die beiden Elektronen eines Cooper-Paares gemäß ihres Eigendrehimpulses (Spin, kurze Pfeile in Abb. 4) selektiert und somit

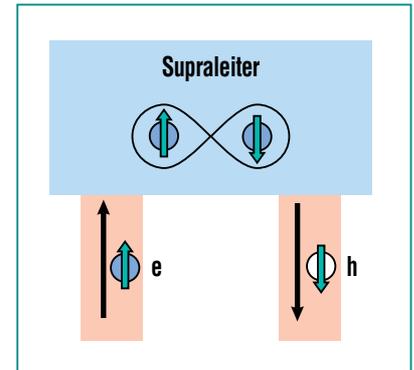


Abb. 4: Schematische Darstellung der nichtlokalen Andreev-Reflexion: Ein Elektron wird von einem Kontakt in einen Supraleiter injiziert und als Loch mit umgekehrtem Spin in einen nahegelegenen zweiten Kontakt reflektiert. Dabei entsteht ein Cooper-Paar.

räumlich getrennt werden. Während in konventionellen Supraleitern die Spins der Elektronen eines Cooper-Paares antiparallel sind (Singulett), werden in einigen unkonventionellen Supraleitern auch Triplett-Zustände vermutet. Neben der Erzeugung verschränkter Elektronenpaare kann die nichtlokale Andreev-Reflexion somit auch zur Untersuchung der Struktur der Cooper-Paare genutzt werden und damit Aufschluss über die Physik unkonventioneller Supraleiter geben.

Literatur

- [1] E. Scheer und H. v. Löhneysen, *FZK-Nachrichten* 31, 149 (1999)
- [2] J. Reichert, R. Ochs, D. Beckmann, H.B. Weber, M. Mayor, H. v. Löhneysen, *Phys. Rev. Lett.* 88, 176804 (2002)
- [3] J. Reichert, H.B. Weber, M. Mayor, H. v. Löhneysen, *Appl. Phys. Lett.* 82, 4137 (2003)
- [4] J.C. Cuevas, J. Henrich, A. Martin Rodero, A. Levy Yeyati, G. Schön, *Phys. Rev. Lett.* 88, 157001 (2002)
- [5] F. Evers, F. Weigend, M. Koentopp, *Phys. Rev. B* 69, 235411 (2004)
- [6] A. Aviram, M.A. Ratner, *Chem. Phys. Lett.* 29, 277 (1974)
- [7] M. Elbing, R. Ochs, M. Koentopp, M. Fischer, C. von Haenisch, F. Weigend, F. Evers, H.B. Weber, M. Mayor, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102, 8815 (2005)
- [8] R. Krupke, F. Henrich, *Adv. Eng. Mat.* 7, 111 (2005)
- [9] R. Krupke, F. Henrich, H. v. Löhneysen, M. M. Kappes, *Science* 301, 344 (2003)
- [10] R. Krupke, S. Linden, M. Rapp, F. Henrich, *Adv. Mat.* 2006, 10.1002/adma.200600134
- [11] D. Beckmann, H.B. Weber, H. v. Löhneysen, *Phys. Rev. Lett.* 93, 197003 (2004)

Photonische Metamaterialien

S. Linden, M. Wegener, INT

Warum ist die Phasengeschwindigkeit c des Lichts im Glas oder in einem Kochsalzkristall kleiner als im Vakuum? Eine typische Antwort eines Physikers oder Ingenieurs könnte lauten: „Das elektrische Feld des Lichts regt im Material mikroskopische elektrische Dipole zu Schwingungen an. Diese Dipole strahlen dann wieder elektromagnetische Wellen ab, regen damit andere elektrische Dipole an, usw. Daher bewegt sich das Licht (meist) langsamer um einen gewissen Faktor, den wir die optische Brechzahl $n = c_0/c$ nennen. Ihr Quadrat ist gleich der elektrischen Permittivität: $n^2 = \epsilon$.“ Meistens richtig, denn in jedem typischen Optik-Lehrbuch liest man circa auf Seite 10, dass magnetische Dipole bei optischen Frequenzen keine Rolle spielen. In anderen Worten: Die magnetische Permeabilität ist $\mu = 1$, sonst müsste es nämlich heißen $n^2 = \epsilon\mu$, also $n = \pm(\epsilon\mu)^{1/2}$.

Im Jahr 2000 stellten David R. Smith und Mitarbeiter [1], basierend auf den theoretischen Vorarbeiten von Sir John Pendry [2] aus dem Jahr 1999 ein künstliches Material vor, ein sogenanntes „Metamaterial“, das im Mikrowellenbereich (10-GHz-Frequenz) nicht nur eine magnetische Antwort mit $\mu < 0$ aufwies, sondern zusammen mit $\epsilon < 0$ im gleichen Frequenzbereich auch noch eine negative Brechzahl $n = -(\epsilon\mu)^{1/2} < 0$. Ein Jahr später konnte die Gruppe sogar experimentell zeigen, dass mit der negativen Brechzahl beim Übergang einer elektromagnetischen Welle vom Material in Luft eine Brechung zur „falschen“ Seite des Lots einhergeht [3]. Im Snellius-Brechungsgesetz wird der Bre-

chungswinkel negativ, die Brechzahl somit auch.

Was versteht man eigentlich unter Metamaterialien? Normale Materialien (z. B. Kristalle) haben typische interatomare Abstände (Gitterkonstanten) im Bereich eines halben Nanometers. Dies ist circa drei Größenordnungen kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Daher mittelt das Licht über die atomare Struktur und „sieht“ – abgesehen von den Symmetrien des Kristalls – die atomare Periodizität nicht. Die Materialien können deshalb als effektive homogene Medien beschrieben werden. Metamaterialien bestehen aus funktionellen Bausteinen, künstlichen „Atomen“, deren Eigenschaften maßgeschneidert werden können. Sie können z. B. unter anderem auch ein magnetisches Dipolmoment aufweisen. Diese „Atome“ können zu einem „Kristall“ mit einer künstlichen „Gitterkonstanten“ angeordnet werden. Ist diese „Gitterkonstante“ deutlich kleiner als die Wellenlänge des Lichts, kann auch das Metamaterial als effektives homogenes Medium beschrieben werden.

Wie kann man mit Hilfe von Metamaterialien Magnetismus (also $\mu \neq 1$) bei optischen Frequenzen erreichen? Offenbar werden magnetische „Atome“ benötigt, also magnetische Dipole, die auch bei optischen Frequenzen noch nennenswert auf das äußere Feld reagieren. Metallische Ringe mit einem Schlitz [2] sind eine Möglichkeit: Die beiden Enden des Drahtes formen die Platten eines Plattenkondensators mit Kapazität C , die in Serie zur Induktivität L des Rings geschaltet ist (siehe Abb. 1). Daher ergibt sich eine elektromagnetische Resonanz bei der LC-Frequenz $\omega_{LC} = 1/(LC)^{1/2}$. Das magnetische Dipolmoment eines Rings steht bekanntermaßen senkrecht auf der Ebene des Rings. Bei räumlich dichter (kristalliner) Packung der geschlitzten Ringe („split-ring resonators“) in einem Metamaterial kann so $\mu < 0$ erreicht werden [2]. Die Frequenzabhängigkeit der magnetischen Permeabilität $\mu(\omega)$ des geschlitzten Rings ist das magnetische Analogon zum Lorentz-Oszillatormodell für die elektrische Permittivität $\epsilon(\omega)$ eines elektrischen Dipols: Unterhalb der Resonanz reagiert das Material paramagnetisch, oberhalb diamagnetisch.

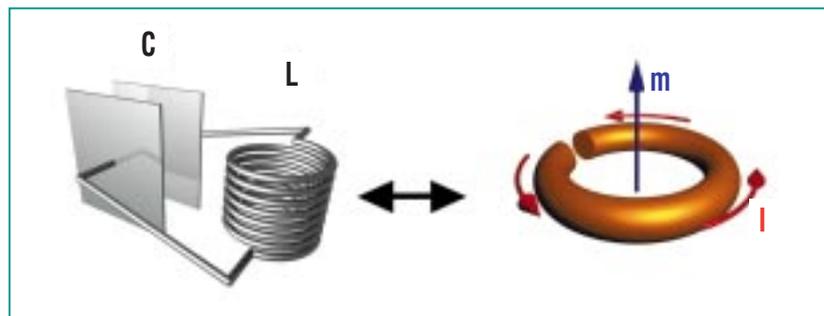


Abb. 1: Illustration der Analogie zwischen einem LC-Schwingkreis und einem geschlitzten Ring. Durch Anregung eines zirkulierenden Stroms I im geschlitzten Ring durch das äußere elektromagnetische Feld wird ein magnetisches Moment m hervorgerufen.

Für nicht zu kleine Strukturen sind sowohl die Induktivität L als auch die Kapazität C des geschlitzten Rings proportional zum Durchmesser des Rings. Somit wird die LC-Frequenz umgekehrt proportional zur Ringgröße. Möchte man zu Wellenlängen der Telekommu-

nikation um 1500 nm gelangen, sind Ringdurchmesser im Bereich von 150 nm, also minimale Strukturbreiten von circa 50 nm, erforderlich (siehe Abb. 2) – die Methoden der Nanotechnologie sind also einmal mehr gefragt.

Nach entsprechenden Vorexperimenten mit circa doppelt so großen Strukturen [4] und nachfolgenden Designstudien [5] konnten wir 2005 in der Tat in den Telekommunikationsbereich vorstoßen [6,7]. Die gemessenen optischen Transmissions- und Reflexionsspektren der mittels Elektronenstrahlolithographie hergestellten Strukturen zeigen je nach Anregungsgeometrie mehrere ausgeprägte Resonanzen (siehe Abb. 3). Die eingehende Analyse der Spektren sowie der Vergleich mit der Theorie zeigen [4-6], dass die Resonanz um 1500 nm Wellenlänge in der Tat der Bedingung $\mu < 0$ genügt (bei geeigneter Polarisation).

Die außerordentlich schnelle Entwicklung auf dem Gebiet der Metamaterialien in den letzten fünf Jahren hat künstlichen Magnetismus über mehr als vier Zehnerpotenzen der Frequenz hinweg von ersten Demonstrationen im Mikrowellenbereich bis hin zur Optik

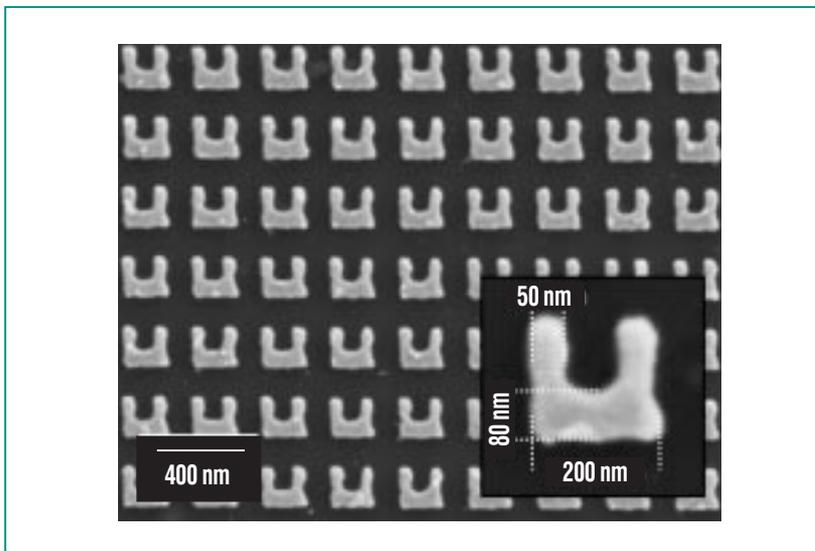


Abb. 2: Elektronenmikroskopische Aufnahme einer periodischen planaren Anordnung von geschlitzten Ringen aus Gold.

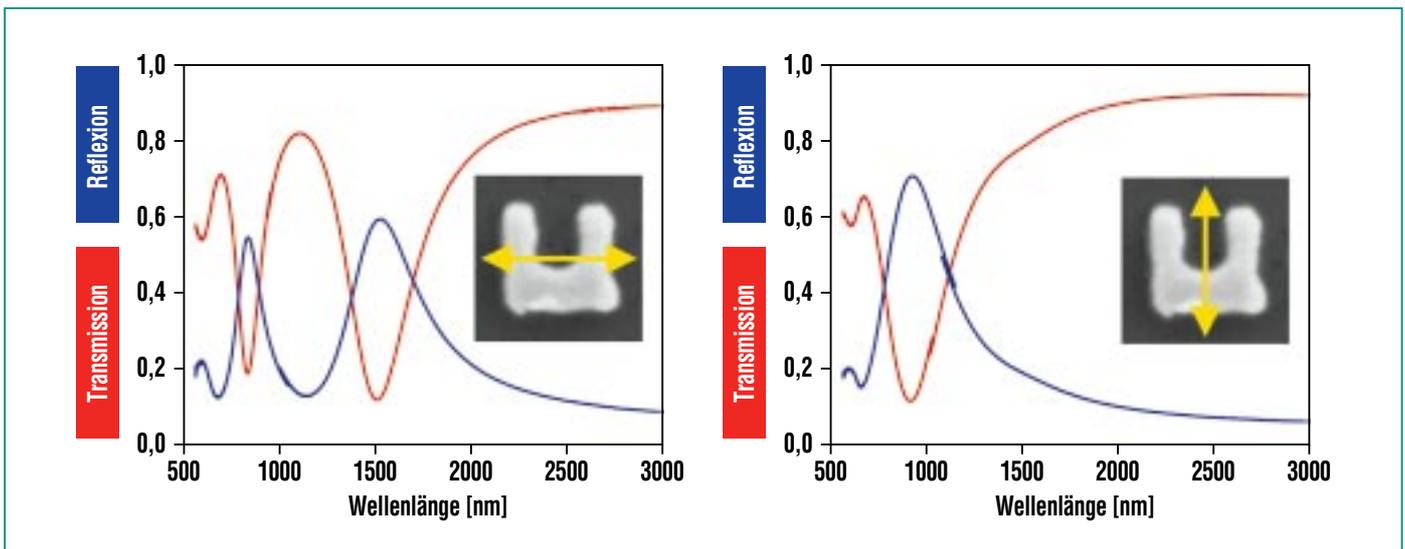


Abb. 3: Transmissions- und Reflexionsspektren der in Abb. 2. gezeigten Probe für senkrechten Einfall. Linke Seite: Anregung mit horizontal polarisiertem Licht. Rechte Seite: Anregung mit vertikal polarisiertem Licht. Für horizontal polarisiertes Licht mit einer Wellenlänge $\lambda = 1500$ nm kann die fundamentale magnetische Mode des geschlitzten Ringes beobachtet werden.

gebracht. Kombiniert man die negative magnetische Permeabilität μ mit einer negativen elektrischen Permittivität ϵ („verdünntes Metall“), so gelangt man zu einer negativen optischen Brechzahl n [8].

Die Phasengeschwindigkeit des Lichts c wird negativ, also dem Poynting Vektor der Welle entgegengesetzt. Dies ermöglicht nicht nur interessante quantenoptische oder nichtlinear optische Experi-

mente, sondern eröffnet auch neue optische Elemente wie z. B. die so genannte „perfekte Linse“ [9], die prinzipiell optische Abbildungen mit einer Auflösung weit unterhalb der Wellenlänge des Lichts erlaubt.

Literatur

- [1] D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz, *Phys. Rev. Lett.* 84, 4184 (2000)
- [2] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart, *IEEE Trans. MTT* 47, 2075 (1999)
- [3] R.A. Shelby, D.R. Smith, S. Schultz, *Science* 292, 77 (2001)
- [4] S. Linden, C. Enkrich, M. Wegener, J. Zhou, T. Koschny, C. Soukoulis, *Science* 306, 1351 (2004)
- [5] C. Enkrich, F. Pérez-Willard, D. Gerthsen, J. Zhou, C.M. Soukoulis, M. Wegener, S. Linden, *Adv. Mater.* 17, 2547 (2005)
- [6] C. Enkrich, M. Wegener, S. Linden, S. Burger, L. Zschiedrich, F. Schmidt, J. Zhou, T. Koschny, C.M. Soukoulis, *Phys. Rev. Lett.* 95, 203901 (2005)
- [7] G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, J. F. Zhou, C.M. Soukoulis, S. Linden, *Opt. Lett.* 30, 3198 (2005)
- [8] G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, C. M. Soukoulis, S. Linden, *Science* 312, 892 (2006)
- [9] J.B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966 (2000)

SONOSYS®
 Measuring
 microCounts together

Hochfrequente Ultraschall-Reinigungssysteme
(Megasonic) für die Halbleiter-Produktion und
 die Mikro-/Nano-Technik

Effiziente Abreinigung kleinster Partikel bis
 80 nm von empfindlichen Oberflächen und
 aus Gräben von Nanostrukturen

SONOSYS® GmbH
 Daimlerstraße 6 D-75305 Neuenbürg
 Tel. 07082 / 79184-0 Fax 07082 / 79184-99
 E-Mail: info@sonosys.de http://www.sonosys.de

LIGA: Von der Trenndüse zu Zahnrädern für Luxusuhren

W. Bacher, V. Saile, IMT

Entwicklung des LIGA-Verfahrens

Von der Gründung im Jahr 1957 bis zum Jahr 1988 wurde am damaligen Institut für Kernverfahrenstechnik (IKVT) unter der Leitung von E. W. Becker Forschung und Entwicklung für das Trenndüsenverfahren zur Anreicherung des leichten Uranisotops U-235 betrieben. Die technische Herausforderung bei dieser Technologie bestand darin, immer leistungsfähigere Trenndüsen herzustellen, d. h. feine Strukturen mit lateralen Dimensionen im Mikrometerbereich bei gleichzeitig großer Tiefe. Anfang der 80er Jahre waren die bis dahin entwickelten Herstellungsverfahren für Trenndüsen an die Grenze des technisch Machbaren gekommen. Um die weiter steigenden Anforderungen nach geringeren Abmessungen der Trenndüsen und immer höherer Präzision erfüllen zu können, wurde eine neue Strukturierungstechnik auf der Basis von Lithographie mit hochenergetischer Röntgenstrahlung entwickelt, die heute unter dem Namen LIGA-Technik (Lithografie, Galvanoformung und Ab-

formung) weltweit bekannt ist [1,2]. Geeignete Strahlung für den zentralen Prozessschritt Röntgentiefenlithografie wird von modernen Teilchenbeschleunigern wie der Synchrotronstrahlungsquelle ANKA [3] emittiert.

Nach dem Auslaufen der Arbeiten auf dem Gebiet der Kernverfahrenstechnik wurde die Mikrotechnik systematisch ausgebaut und 1989 das IKVT in das Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) überführt. Zahlreiche Ergebnisse demonstrierten in den 90er Jahren die Leistungsfähigkeit und das Potenzial der LIGA-Technik. Neben wissenschaftlichen Erfolgen konnte auch ein erster kommerzieller Erfolg verbucht werden: ein LIGA-Mikrospektrometer, das die Firma microParts in Dortmund in zunehmenden Stückzahlen fertigt und vertreibt. Während in der Fachwelt der Name „LIGA“ weltweit bekannt und wegen der wissenschaftlichen Erfolge anerkannt ist, hat die berühmte Ameise mit ihrem LIGA-

Zahnrad, die aus dem Forschungszentrum stammt, die Mikrotechnik in der breiten Öffentlichkeit populär gemacht (Abb. 2).

Fertigung von Mikrobauteilen mit Synchrotronstrahlung an ANKA

Mit ANKA verfügt das Forschungszentrum Karlsruhe seit 2002 über eine eigene Synchrotronstrahlungsquelle. Damit wurde die entscheidende Lücke in der LIGA-Prozesskette geschlossen. So wurde es möglich, Mikrobauteile in großer Zahl und kostengünstig direkt mit Synchrotronstrahlung zu fertigen (Direkt-LIGA). Dabei wird jede Komponente einzeln lithografisch hergestellt, ähnlich wie dies in der Fertigung von Halbleiterbausteinen der Fall ist. Direkt-LIGA bietet entscheidende Vorteile hinsichtlich der Strukturtreue und Qualität der Komponenten, insbesondere könnte auch die Zahl der Fertigungsschritte drastisch

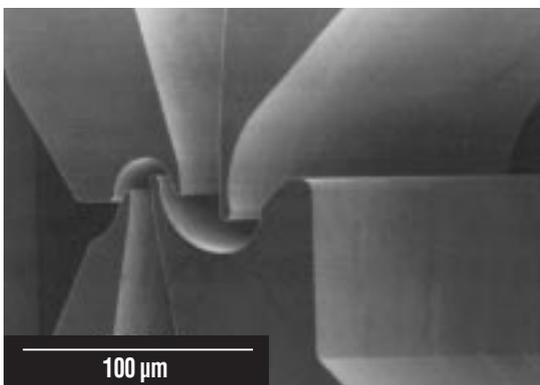


Abb. 1: Trenndüse (sog. Doppelumlenksystem) aus Nickel, hergestellt nach dem LIGA-Verfahren.



Abb. 2: Die berühmteste Ameise der Welt – das Wappentier für die Mikrosystemtechnik.

reduziert werden. ANKA bietet die Möglichkeit, neue Konzepte zur Bestrahlung großer Flächen und damit einer Reduzierung der Kosten zu verwirklichen.

An ANKA werden heute zahlreiche LIGA-Projekte rund um die Uhr durchgeführt. Ein Feld, in dem die LIGA-Technik besonders erfolgreich eingesetzt werden kann, ist die Mikrooptik. Dabei werden Bauteile wie Filter mit Sub-Mikrometerstrukturen, Wellenleiter und Photonische Kristalle hergestellt. Die hohe Präzision von LIGA in Verbindung mit einem hohen Aspektverhältnis erlaubt auch die Fertigung von Haltestrukturen, Justagehilfen und optischen Bänken mit einer Genauigkeit, die mit anderen Methoden nicht erreichbar ist. Auf dieser Basis wurden Abstandssensoren, IR-Interferometer, Beamsplitter und viele andere optische Komponenten und Systeme realisiert [2]. Aus einer breiten Palette von Anwendungen sollen im Folgenden nur zwei ausgesucht werden: eines, das für die Forschung und Entwicklung von Instrumenten steht und eines, das einen konkreten kommerziellen Hintergrund hat.

Beispiel aus der Wissenschaft: Röntgenlinsen

Mit dem LIGA-Verfahren werden an ANKA Linsenarrays (Abb. 3) hergestellt, die Röntgenstrahlen bündeln [4]. Das lithographische Verfahren ermöglicht die Darstellung sehr komplexer, vorher berechneter Strukturen in SU-8, das gegen Röntgenstrahlen beständig ist. Durch zweifache Belichtung des Kunststoffes werden Linsensysteme

hergestellt, die in zwei Richtungen fokussieren.

Die Einsatzmöglichkeiten für Röntgenlinsen sind vielfältig: So warten die Biologen auf Röntgenmikroskope, mit denen Auflösungen im Nanometerbereich möglich sind. Die Astronomen benötigen Röntgenlinsen, um Röntgenteleskope für den Einsatz auf Satelliten zu bauen. Die Einsatzmöglichkeiten in der orts aufgelösten Analytik kleinster Materialproben sind fast unbegrenzt.

In Kooperation mit europäischen Partnern, die ihre Experimente an verschiedenen Synchrotron-Strahlungsquellen betreiben, werden Leistungsfähigkeit und Grenzen der neuartigen Linsensysteme getestet. Gemeinsam mit der Universität Karlsruhe wird der Einsatz an konventionellen Röntgenröhren untersucht.

Beispiel für die Kommerzialisierung des LIGA-Verfahrens: Uhrenzahnäder

Anker und Ankerräder für Luxusuhren der Schweizer Traditionsmarke H. Moser & Cie. werden serienmäßig im LIGA-Verfahren hergestellt [5]. Die LIGA-Bauteile führen wegen ihrer geometrischen Exaktheit und sehr glatten Seitenwände zu einem Qualitätssprung für die Präzision und Ganggenauigkeit der Uhrwerke. Da die Teile aus (fast reinem) Gold bestehen, passen sie zu den ästhetischen und wertvollen Uhren.

Mit Hilfe des LIGA-Verfahrens können Teile des Uhrwerks jetzt mit so hoher Präzision gefertigt werden, dass auf die Schmierung vollstän-

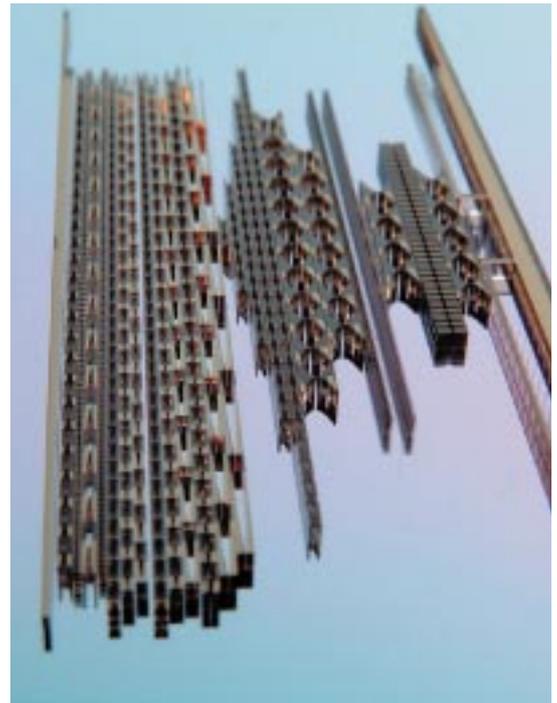


Abb. 3: Anordnung von Kunststofflinsen auf einer Linsenplatte: Unterschiedliche Linsensysteme fokussieren Röntgenstrahlen mit verschiedenen Brennweiten.

dig verzichtet werden kann. Dies führt unmittelbar zu größeren Wartungsintervallen und einer längeren Lebensdauer der Uhrwerke. Als Material für die Uhrenbauteile wird galvanisch aufgewachsenes Gold eingesetzt, das durch Zugabe geringer Mengen anderer Metalle eine große Härte erreicht. Zudem sind die Goldteile antimagnetisch und korrosionsbeständig, zwei wichtige Eigenschaften in einem mechanischen Uhrwerk. Dies ist besonders wichtig für Anker und Ankerrad, zwei der am meisten beanspruchten Bauteile, die mit hohen Schwingungsfrequenzen maßgeblich für die Ganggenauigkeit der Uhr verantwortlich sind. Diese Teile wurden in größeren Stückzahlen an den Kooperationspartner Precision Engineering AG

in Schaffhausen in der Schweiz geliefert.

Das Forschungszentrum Karlsruhe baut derzeit an der Synchrotronstrahlungsquelle ANKA im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts FELIG eine weitgehend automatisierte Fertigungsstraße für die Herstellung von LIGA-Bauteilen. FELIG, das ab 2008 betriebsbereit ist, erlaubt eine um den Faktor 20 höhere Fertigungskapazität. Die Herstellungskosten werden aufgrund der Automatisierung gegenüber heute um mindestens 50 Prozent sinken. Damit wird auch eine Fertigung von mechanischen Bauteilen für weniger exklusive Anwendungen wie z. B. Zahnräder für mechanische Getriebe attraktiv.



Abb. 4: Anker und Zahnrad aus hartem Gold für mechanische Uhrwerke werden im Forschungszentrum Karlsruhe mit dem LIGA-Verfahren so präzise hergestellt, dass keine Schmierung mehr erforderlich ist.

Literatur

- 1] E.W. Becker, *Von der Kerntechnik zur Mikro-technik – 30 Jahre Institut für Kernverfahrenstechnik, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Bericht KfK 4607 (1988) und darin zitierte Quellen*
- 2] W. Menz, J. Mohr, O. Paul, *Mikrosystemtechnik für Ingenieure, 3. Auflage, WILEY-VCH, Weinheim (2005)*
- 3] V. Saile, *Vorgeschichte und Konzept der Karlsruher Synchrotronstrahlungsquelle* sowie V. Saile et al., *Ausblick und Visionen für ANKA, Nachrichten 32, 4 (2000), 261–263 und 378–382*
- 4] V. Nazmov, V. Saile, E. Reznikova, J. Mohr, M. Börner, T. Mappes, T. Ernst, R. Simon, *Planare refraktive Röntgenlinsen, Nachrichten 37, 4 (2005), 219–223*
- 5] M. Arendt, *Direkt-LIGA für die Herstellung von Zahnrädern, Nachrichten 37, 4 (2005), 210–214*

Dünnschichtdesign im Nanomaßstab

S. Ulrich, M. Stüber, H. Leiste, IMF

Einleitung

Neue Oberflächenschichten, die mehrere Funktionen gleichzeitig ausüben, müssen für spezielle, neuartige Anwendungsfelder maßgeschneidert entwickelt werden [1]. Dabei ist es wichtig, einen ganzheitlichen Lösungsansatz zu wählen, der die gesamte technologische Prozesslinie umfaßt (Abb. 1). Ausgehend vom Nanodesign und den damit verbundenen thermodynamischen und molekulardynamischen Modellierungen muss eine mögliche Syntheseroute erarbeitet werden, die in der Regel mit Gasphasenabscheidungsprozessen (PVD: physical vapor deposition: physikalische Gasphasenabscheidung und PECVD: plasma enhanced chemical vapor deposition: Plasma unterstützte chemische Gasphasenabscheidung) realisiert werden kann. Mit beträcht-

lichem experimentellem und analytischem Aufwand muss dann der Nachweis des Aufbaus wie die chemische Zusammensetzung und der postulierten Struktur und daraus folgend des gewünschten Eigenschaftsprofils sowohl auf der µm- als auch auf der nm-Skala, zum Teil sogar auf der atomaren Skala nachgewiesen werden. In der Regel sind hier mehrere Iterationsvorgänge zur Schichtoptimierung und zum tieferen Verständnis der Korrelationen zwischen Herstellung, Aufbau und Eigenschaften erforderlich. Auch die Computersimulationen werden so ständig verfeinert und neue theoretische Modelle erarbeitet. Nachdem schließlich eine neue nanoskalige, funktionelle Oberflächenschicht entwickelt worden ist, muss diese im speziellen Anwendungsfall getestet und im Erfolgsfall in einen industriellen Prozess umge-

setzt werden. Hier ist die Abteilung Stoffverbunde und Dünnschichten des Instituts für Materialforschung I des Forschungszentrums Karlsruhe hinsichtlich Know-how-Transfer und bei Bedarf bei der Aufskalierung und Implementation beratend tätig. Die beiden letztgenannten Tätigkeitsfelder stellen jedoch nur einen kleinen, wenn auch wichtigen Teil der Aktivitäten dar.

Nanoskaliges Design

Der Charme eines nanoskaligen Schichtdesign liegt darin, dass man durch die Ausnutzung größenabhängiger Effekte im nm-Bereich und durch die Eigenschaften der Grenzflächen völlig neue Materialeigenschaften erzeugen kann [1]. Indem man die Beweglichkeit der Teilchen während der Synthese gezielt einschränkt, lässt sich auch

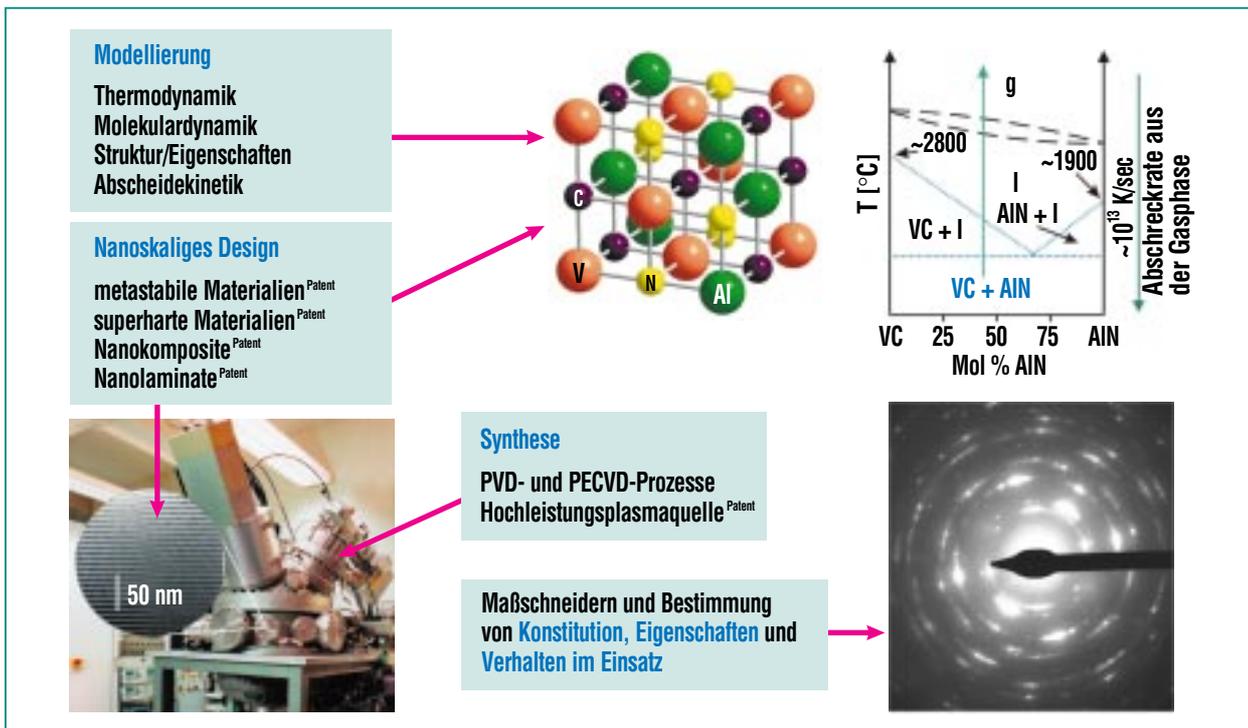


Abb. 1

ein amorphes Netzwerk oder eine nanokristalline Struktur mit einem extrem hohen Grenzflächenanteil herstellen. Desweiteren kann man auch metastabile Materialien synthetisieren, beispielsweise einen nanokristallinen, metastabilen, kubisch flächenzentrierten (V,Al)(C,N)-Mischkristall mit einer Härte von 3260 HV_{0,05} (Abb. 1). Zum Vergleich: gehärteter Werkzeugstahl besitzt typischerweise eine Härte von 1000 HV und Hartmetall 1600 HV. Der Nachweis der Mischkristallstruktur wurde eindeutig mit Elektronenbeugung erbracht (Abb. 1, unten rechts). Wie das entsprechende Phasendiagramm in Abb. 1 zeigt, würden sich unter thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen zwei Phasen, nämlich kubisch flächenzentriertes VC mit einer Härte von 2300 HV und hexagonales AlN mit einer Härte von 1230 HV ausbilden. Nicht nur, dass der metastabile (V,Al)(C,N) Mischkristall aufgrund der zweifachen Mischkristallverfestigung und seiner nanokristallinen Struktur mit optimierten Grenzflächen wesentlich härter als die beiden einzelnen Komponenten ist, er besitzt aufgrund seiner Nanokristallinität und seiner kubisch flächenzentrierten Kristallstruktur auch eine ausgesprochen hohe Zähigkeit. Obwohl es sich um eine metastabile Struktur handelt, zeigt diese, wenn sie erst einmal gebildet ist, eine thermische Stabilität bis zu Temperaturen von 850 °C, was die Einsatzmöglichkeit für ein breites Anwendungsspektrum eröffnet. Für den Verschleißschutz hochinteressant sind auch superharte Materialien wie der Diamant (Härte: 10000 HV), das kubische Bornitrid (Härte: 6000 HV) [2] und Borkarbid (Härte: 4000 HV).

Alle diese Materialien können heute mit der Gasphasenabscheidung hergestellt werden und befinden sich bereits in den unterschiedlichsten High-Tech-Anwendungen. Im Folgenden sollen zwei weitere Erfolg versprechende, hochflexible, nanoskalige Schichtdesigns näher vorgestellt werden: Nanokomposite und Nanolamine.

Nanokomposite

Bei Kompositen wird ein Material in ein zweites eingebettet, mit dem Ziel, die positiven Eigenschaften beider Materialien miteinander zu verschmelzen. Dabei hat der Komposit in der Regel um so bessere Eigenschaften, je feiner das einzubettende Material und je gleichmäßiger es verteilt ist. Aus diesem Grunde weisen die Nanokomposite herausragende Eigenschaften auf. In diesem Abschnitt soll aufgezeigt werden, wie sich superharte kubische Bornitrid-Nanokristallite mit einer amorphen, diamantartigen Kohlenstoffschicht überziehen und zu einem Gesamtkomplex mit hoher Härte und geringen Reibwerten verbinden lassen [3]. Zu Beginn werden thermodynamische Modellierungen im Materialsystem Bor, Kohlenstoff und Stickstoff durchgeführt, aus denen sich ergibt, dass sich mit zunehmender Synthesetemperatur bei der Gasphasenabscheidung von Schichten mit einer Zusammensetzung von B : N : C = 44 : 43 : 13 folgender Aufbau zu erwarten ist: (A1) ein amorphes B-C-N-Netzwerk, (A2) hexagonales oder kubisches Bornitrid in einer amorphen Kohlenstoffmatrix, (A3) ein hexagonales oder kubisches Bornitrid in einer amorphen Kohlenstoffmatrix, (A4) h-BN oder c-BN in Kom-

position mit Graphit oder Diamant. Im Falle der Schichtherstellung durch reaktives Magnetronzerstäuben eines BCN-Komposit-targets in einem Argon/Stickstoffplasma kann der gewünschte Schichtaufbau A2 bei Temperaturen zwischen 260 °C und 500 °C erzielt werden. Es gilt jedoch, die Ausbildung der hexagonalen Phase, die ähnlich wie Graphit sehr weich ist, zu verhindern. Dies ist möglich, wenn man alle relevanten Oberflächenprozesse wie die direkte und indirekte Subplantation, die Oberflächendiffusion, die Relaxation und die Zerstäubung modellieren und kontrollieren kann, wozu man heute in der Lage ist. Dabei sind alle Prozesse von der Ionenenergie abhängig. Wenn man Argon und Stickstoffionen mit Hilfe von geeigneten elektrischen Feldern aus dem Plasma extrahiert und während des Schichtwachstums auf das Substrat beschleunigt, so können diese entweder direkt unter die Schlichtoberfläche implantiert werden oder durch Stoßprozesse mit Oberflächenatomen in etwas tiefere Lagen versetzt werden. In beiden Fällen wird das Material erheblich verdichtet. Da hexagonales Bornitrid eine Dichte von 2,2 g/cm³ und kubisches Bornitrid von 3,5 g/cm³ hat, kann unter günstigen Bedingungen eine vollständige Transformation vom hexagonalen ins kubische Bornitrid erreicht werden. Auf die gleiche Weise werden durch Ionenbeschuss auch im amorphen Kohlenstoffnetzwerk diamantartige Atomanordnungen erzeugt. Die optimalen Bedingungen für c-BN/DLC-Nanokomposite sind im dargestellten Diagramm in Abb. 2 als rote Punkte gekennzeichnet. Das Verhältnis des Ionenflusses

zum Boratomfluss liegt zwischen 0,7 und 2,5 und die Ionenenergie zwischen 125 eV und 300 eV. Besonders aufwändig ist die Verifikation des nanoskaligen Schichtaufbaus, bei der verschiedene Analyseverfahren miteinander kombiniert werden müssen. Mittels Mikrosonde und AES kann die Schichtzusammensetzung bestimmt werden. Das Bor-zu-Stickstoff-Verhältnis beträgt 1,02 und der Kohlenstoffgehalt 13,3 At-%. Das kubische Bornitrid wird mittels Röntgenbeugungsuntersuchungen (XRD), AES und FTIR nachgewiesen. Mit diesen Verfahren kann auch die Existenz von Borcarbid ausgeschlossen werden. Diese Phasenseparation von c-BN und DLC wird zusätzlich durch XPS bestätigt. Die HRTEM-Abbildung (Abb. 2, rechts unten) zeigt die (111)-Netzebenen eines c-BN-Nanokristalls, der auf einer (200) h-

BCN-Ebene nukleiert. Das Beispiel der c-BN/DLC-Nanokomposite zeigt deutlich die notwendige, aber aufwändige Analyse im Bereich der Forschung und Entwicklung von Nanokompositen.

Nanolamine

Statt ein Material in ein zweites einzubetten, können die beiden Materialien auch alternierend aufeinandergestapelt werden, um die positiven Eigenschaften der beiden Materialien zu kombinieren. Es kann gezeigt werden, dass TiN-ZrN-Nanolamine (Abb. 3) [4] mit stängelförmiger Morphologie und heteroepitaktischen Grenzflächen ein erfolgreiches Schichtdesign für den Verschleißschutz von HSS-Sägeblättern beim Sägen von schwefelhaltigen Eisenlegierungen darstellen. Dabei werden die Hohlräume zwischen den

Stängeln zum Deponieren von Kühlschmiermittel genutzt, um ein günstiges tribologisches Verhalten im Einsatz hervorzurufen. Desweiteren werden durch periodische Eigenspannungsfelder sowie durch die Grenzflächen zwischen den einzelnen Lagen die Rissausbreitung erschwert bzw. sich ausbreitende Risse abgelenkt. Die Schichtherstellung erfolgt durch reaktives Gleichstrom-Magnetronzerstäuben von metallischen Titan- und Zirkontargets in einer Argon-Stickstoff-Atmosphäre. Durch die Variation der Lagenzahl bei konstanter Schichtdicke kann der Grenzflächenanteil in den TiN-ZrN-Nanolaminen gezielt eingestellt werden, wodurch sich die Viellagenschichten hinsichtlich ihres Aufbaus, ihrer Eigenschaften und ihres Verhaltens im Einsatz maßschneidern lassen. Bei 50 Einzelschichten kann eine Standzeiterhöhung

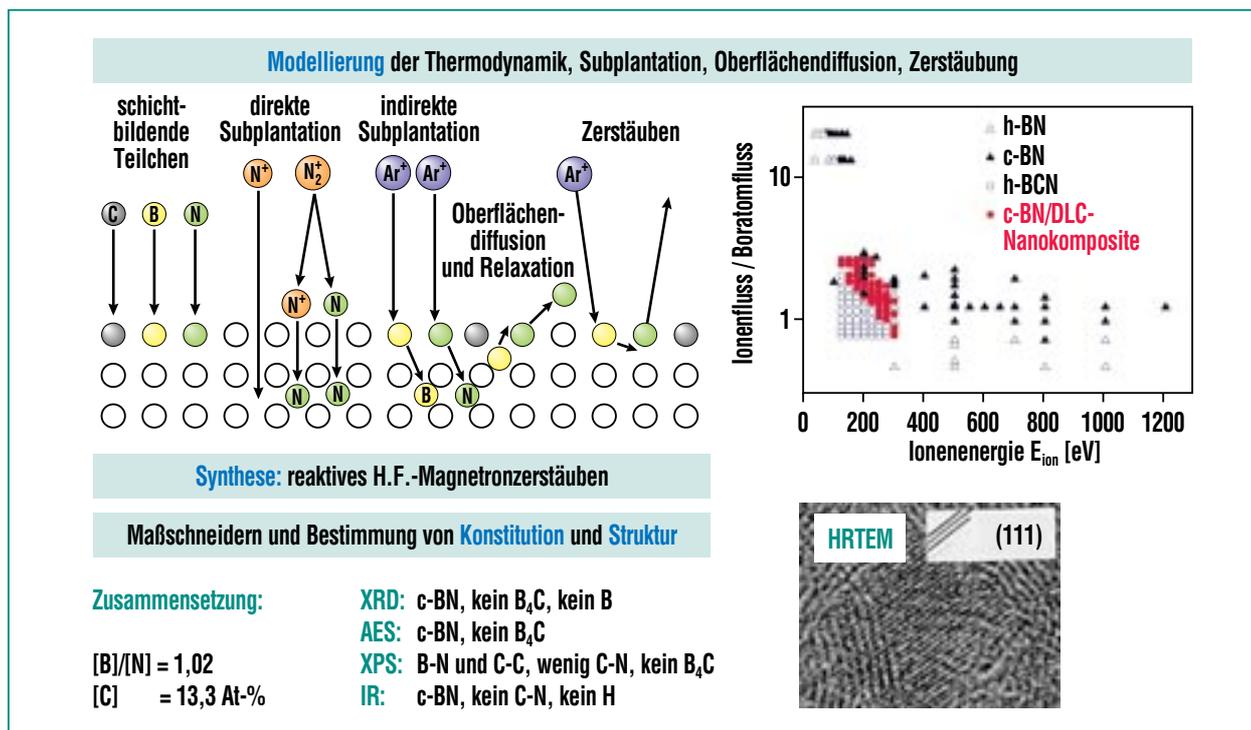


Abb. 2

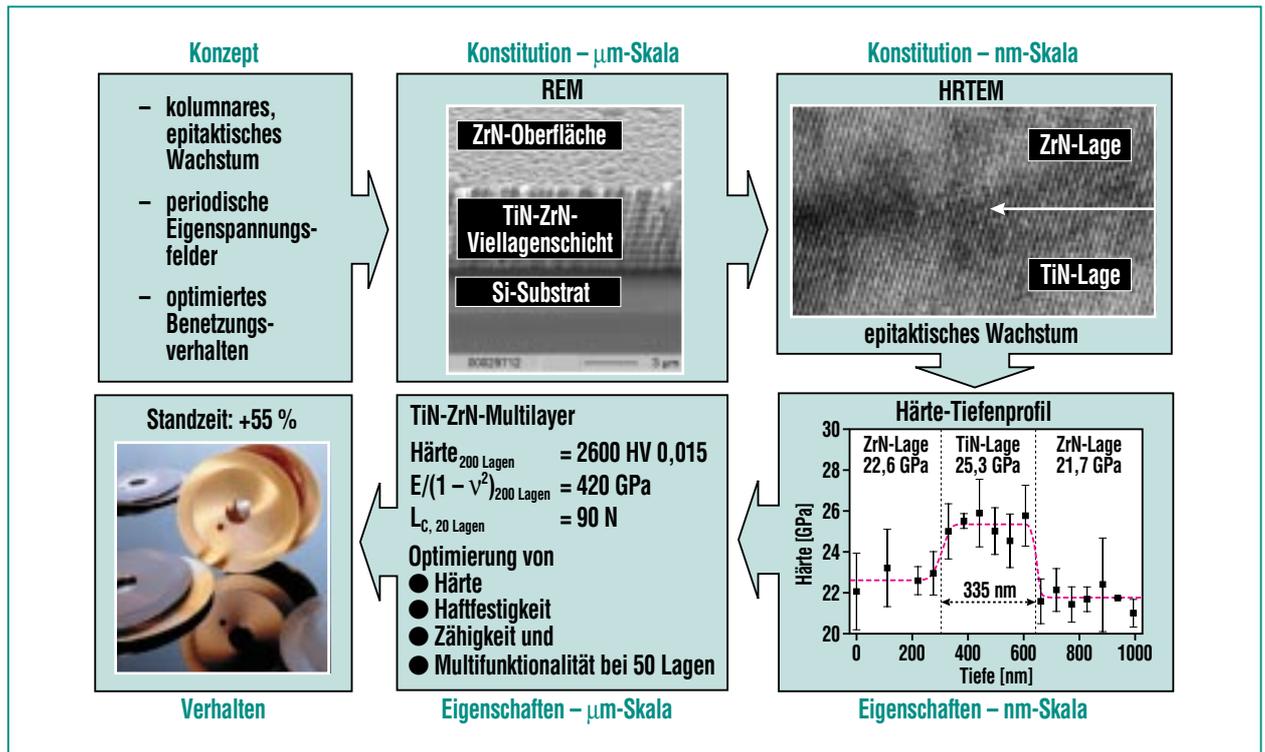


Abb. 3

von 36.000 auf 56.000 Schnitt gegenüber den unbeschichteten Sägeblättern erzielt werden. Die Härte des optimierten Gesamtverbundes beträgt 2450 HV0,015, das reduzierte E-Modul 415 GPa und die kritische Last des Versagens im Scratch-Test 90 N, d. h. die Haftfestigkeit liegt in einem Bereich, der normalerweise nur durch die CVD-Abscheidung erreicht werden kann. Die gezielte Optimierung die-

ser nanoskaligen Oberflächenschichten kann nur aufgrund eines vertieften Verständnisses zwischen dem Schichtwachstum, dem Aufbau, den Eigenschaften und dem Verhalten der Nanolamine und deren Grenzflächen erfolgen. Dazu müssen der Aufbau der Nanolamine mittels HRTEM und auch die Eigenschaften wie die Härte auf der Nanometerskala gemessen und modelliert werden.

Fazit

Nanoskalige, funktionelle Oberflächenschichten lassen sich mit Hilfe von Nanokompositen und Nanolaminen maßschneidern. Dabei baut die Schichtentwicklung im wesentlichen auf drei Säulen auf: die Modellierung, die Ausnutzung und Erforschung größenabhängiger Effekte sowie das gezielte Grenzflächendesign.

Literatur

- [1] H. Holleck, H. Leiste, M. Stüber, S. Ulrich, *Nanoskalige Schutzschichten für hochbeanspruchte Bauteile, Nachrichten, Jahrgang 31, 1 (1999) 13-20*
- [2] *Kubische Bornitridschichten – Ein Durchbruch mit Hilfe der Nanotechnologie, Nachrichten, Jahrgang 37, 1-2 (2005) 59-63*

- [3] S. Ulrich, H. Holleck, H. Leiste, L. Niederberger, E. Nold, K. Sell, M. Stüber, J. Ye, C. Ziebert, P. Pesch, S. Sattel, *Nano-scale, multi-functional coatings in the material system C-B-N-H, Surf. Coat. Technol. 200 1-4 (2005) 7-13*

- [4] S. Ulrich, C. Ziebert, M. Stüber, E. Nold, H. Holleck, M. Göken, E. Schweitzer, P. Schloßmacher, *Correlation between constitution, properties an machining performance of TiN/ZrN multilayers, Surf. Coat. Technol. 188-189 (2004) 331-337*

Anmerkung: in [3] und [4] wird eine umfassende Literaturübersicht gegeben

Tissue Engineering

K.-F. Weibezahn, IBG

Einleitung

Die Herstellung künstlicher Gewebe ist eine Technik, die vor etwa 20 Jahren durch das neudeutsche Wort Tissue Engineering der Allgemeinheit erst richtig bekannt wurde. Das Bild einer Nacktmaus, die ein riesiges Ohr auf dem Rücken trägt, ist zur fleischgewordenen Ikone dieses Begriffs geworden. Wie so häufig bei neuen Techniken wurden extreme Erwartungen geweckt: Zerstörte oder gestörte Organfunktionen eines Patienten sollen durch funktionales Gewebe regeneriert werden, das durch Tissue Engineering erzeugt wird. Man sieht darin ein ungeheures Potential für zukünftige Anwendungen, besonders in der Regenerativen Medizin, die anstrebt durch neue Therapieformen eine „Restitutio ad integrum“, eine Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands zu erreichen. Solche Aussichten hatten Forscher und Marktstrategen elektrisiert. Die anfängliche Euphorie ist aber inzwischen einer realistischen Einschätzung gewichen. Tissue Engineering ist ein so komplexes Gebiet, das noch viel Grundlagenforschung erfordert.

Der Grund für diese Komplexität wird deutlich, wenn man sich ein Ge-

webe in vivo, also im lebenden Organismus, ansieht: Gewebe besteht aus Zellen, aus der extrazellulären Matrix und aus Signalsystemen, die durch Aktivierung von Genen Signalstoffe ins Spiel bringen, die ihrerseits für den Aufbau des Gewebes oder deren Differenzierung verantwortlich sind. Aufgabe des Tissue Engineering ist es nun, diese Komplexität eines Gewebes möglichst naturnah in vitro (außerhalb des Organismus) nachzubilden.

Die drei Komponenten (kurz: Trias), die für Tissue Engineering notwendig sind, sind solche, die denen des natürlichen Gewebes entsprechen. Hierbei handelt es sich um

- ein Gerüst (scaffold), in oder an das eine extrazelluläre Matrix angelagert ist oder das im Idealfall selbst aus Matrixpolymeren besteht,
- geeignete Zellen, die dieses Gerüst besiedeln und
- Signalmoleküle, die an die Oberfläche des Gerüsts gebunden sein können oder von diesen freigesetzt werden, um eine Gewebe- oder Organbildung zu fördern bzw. die den Differenzierungszustand eines Gewebes aufrecht erhalten.

In vitro veritas?

Mitarbeiter des IBG beschäftigten sich seit langem mit unterschiedlichen Formen von Zellkulturen, um ein Gewebe und sein Verhalten in vitro nachzubilden. So wurden von uns bereits vor Jahren erstmals in Europa dreidimensionale Zellaggregate, sogenannte Sphäroide, von unterschiedlichen Zelllinien kultiviert und charakterisiert. Untersucht man deren Überleben nach ionisierender Bestrahlung so zeigt sich, dass die Zellreaktion davon abhängt, ob diese in einem gewebeähnlichen Verband vorliegen oder in einer eher unnatürlichen Einschichtkultur (Monolayer). Die Reaktion ähnelt in der 3D-Kultur nahezu der in einem Versuchstier (also der in vivo), während sie bei einer Monolayerkultur bis zu einem Faktor 2 von Ergebnissen im Versuchstier abweicht [2]. Solche Untersuchungen lieferten u.a. genauere Vorhersagen für die Effizienz einer Strahlentherapie.

Funktionaler Organersatz

Schwerpunktmäßig wurden später 3D-Kulturen von primären Leberzellen untersucht. Ihre Kultivierung in vitro stellt eine besondere Herausforderung dar, da sie in Monolayerkultur besonders empfindlich sind: Einmal aus dem Körper von Versuchstieren isoliert ist ihre Lebensdauer in Kultur auf wenige Tage begrenzt, wobei ihre Funktionalität noch schneller abnimmt. Bei diesen Zellen zeigt sich, zu welcher komplexen Leistungen die Natur fähig ist und welcher Forschungsaufwand notwendig war, um ihre In-vivo-Funktionalität in vitro nachzubilden.

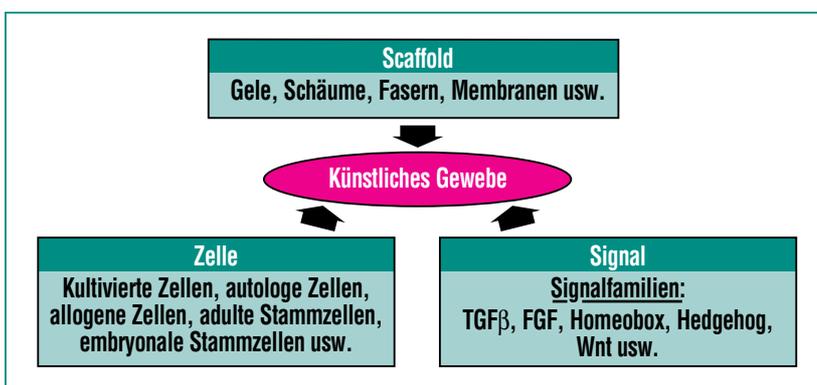


Abb 1: Die drei Komponenten (Trias) des Tissue Engineering (nach [1]).

Bezogen auf die erwähnte Trias wurde ein dreidimensional strukturiertes Scaffold aus Polymeren gewählt, das wir als CellChip bezeichnen [3]. Die Abmessungen seiner Untereinheiten orientieren sich an den Abmessungen der funktionalen Untereinheit der Leber, dem Leberläppchen. Das komplizierte Gefäßsystem der Leber kann in einem In-vitro-Modell jedoch nur rudimentär nachgebildet werden. Lediglich zu- und abführende Leitungen erlauben eine einfache Ver- und Entsorgung der Zellen. Die Natur arbeitet dagegen mit drei Systemen: einem arteriellen und einem venösen Kreislauf, sowie mit Gallenkanälchen, die für den Abtransport der Gallensäuren zuständig sind. Dies ist auch mit komplizierten mikrotechnischen Verfahren nicht nachzubilden, da die Leitungssysteme in der Leber obendrein ineinander verwoben sind.

Die Scaffolds müssen – bei gleichzeitiger Aggregation der Zellen untereinander – für eine gute Zelladhäsion mit einer funktionalen Oberfläche versehen werden. Hier leistet Kollagen gute Dienste. Schließlich werden dem Kulturmedium bestimmte Signalmoleküle zugegeben, die dafür verantwortlich sind, dass die Leberzellen in ihrem Differenzierungszustand, das heißt in ihrer Funktion, stabil bleiben. Diese Signale müssen jedoch so austariert sein, dass die Leber-

zellen in der Kultur auf wechselnde metabolische Anforderungen auch noch mit einer gewissen Dynamik reagieren können. Die richtige Komposition dieser oft mit Rück- und Gegenkopplung arbeitenden Signalwege, die auch in der Leber noch nicht voll verstanden sind, stellt ein mehrdimensionales Optimierungsproblem dar, das bislang erst im Ansatz gelöst ist.

Die Erfolge mit unserem In-vitro-System (Vitalität über Monate, metabolische Funktion über Wochen) zeigen uns, dass wir auf dem richtigen Weg sind [4]. Inzwischen wurde ein Bioreaktor, der viele CellChips enthält, in mehreren Stufen vergrößert, sodass er demnächst im Tierversuch als extrakorporale Leber erprobt werden kann.

Der CellChip-Bioreaktor als Plattform für die Stammzellkultur

Ein immer wichtigerer Zweig des Tissue Engineering befasst sich mit der Kultur von Stammzellen. Auch diese Zellen stellen im Sinne der Trias besondere Anforderungen. Hier kann der im Mikromaßstab präzise Aufbau eines CellChip von besonderem Vorteil sein: Stammzellen benötigen eine spezielle Nische, die aus so genannten Nischenzellen gebildet werden. Diese beeinflussen die Mi-

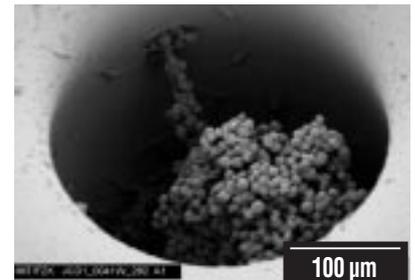


Abb. 2: Zellaggregate in einem Zellcontainer, der durch Mikrothermoformung dünner Polymerfolien hergestellt wurde.

kro-Umgebung der Stammzellen und steuern deren Verhalten.

Unsere Arbeiten konzentrieren sich daher zunehmend auf die Entwicklung von Bioreaktortypen, die diese Nischenfunktion nachbilden und so in der Stammzellen-Grundlagenforschung eingesetzt werden können. Hier spielen Kulturen unterschiedlicher Zellarten ebenso eine Rolle wie die Interaktion der Zellen mit den biologischen Grenzflächen, die als modifizierbare Polymeroberflächen massgeschneidert werden müssen. Bei diesen Aufgaben wundert es niemand, dass das IBG ein Institut mit einer sehr interdisziplinär ausgerichteten Mannschaft ist. Diese lebt aber auch in einem sehr starken Maße von den Kooperationen mit vielen Nachbarinstituten des Forschungszentrums. Wir danken hier besonders den Mitarbeitern von IMVT, IMT, IMF, INT, ITC und ITG.

Literatur

- [1] E. Bell, *in: Principles of Tissue Engineering*, ed. R. Langer, R. Langer, J. Vacanti, 2000, XXXV
- [2] H. Dertinger, M. Guichard, E.P. Malaise, *Radiat Environ Biophys.* 1983, 22(3), 209-14
- [3] E. Gottwald, *Spektrum der Wissenschaft*, 2002, 44-51
- [4] E. Eschbach, S.S. Chatterjee, M. Nöldner, E. Gottwald, H. Dertinger, K.F. Weibezahn, G. Knedlitschek, *J Cell Biochem.* 2005, 95(2), 243-55

Der Zebraäbrbling als Modell der Entwicklung und Regeneration

U. Strähle, S. Rastegar, C. Etard, S. Weg-Remers, F. Müller, ITG

Einleitung

Niemand hatte den durchschlagenden Erfolg des Zebraäbrblings im Jahre 1981 vorhersehen können, als George Streisinger die Vorzüge dieses neuen Tiersystems, zum ersten Mal der Fachwelt vorstellte [1]. Der Genetiker Streisinger hatte sich bereits in den 70er Jahren auf die Suche nach einem Wirbeltier gemacht, das vergleichbare genetische Eigenschaften besitzt, wie seine bisherigen Studienobjekte, die Bakteriophagen (Viren, die Bakterien befallen). Das Ziel der Genetik ist es, vererbare molekulare Veränderungen, sogenannte Mutationen, in einzelnen Abschnitten der Erbinformation, den Genen einzuführen, um deren Effekte auf den Organismus zu studieren. Die Vision von George Streisinger war es ein Wirbeltier zu finden, mit dem man wie mit Bakteriophagen Genetik betreiben kann, um die Funktion von Genen zu entschlüsseln.

Der Zebraäbrbling (Abb. 1A), der wissenschaftlich auch *Danio rerio* und im Englischen „zebrafish“ genannt wird, hatte viele Eigenschaften, die bei einem solchen Unterfangen von Vorteil sind. Die Fische sind im Erwachsenenalter zwischen 3 und 6 cm groß und können 4 bis 6 Jahre alt werden. Dieser tropische Süßwasserfisch, der im Ganges beheimatet ist, legt das ganze Jahr über Eier und ist ohne besonderen Aufwand in Aquarien zu halten. Seine Eier entwickeln sich innerhalb von wenigen Tagen zu freilebenden Larven und dies geschieht komplett außerhalb des Mutterleibes. Dazu kommt noch, dass die Embryonen und Larven optisch transparent sind (Abb. 1B),

so dass die Entwicklung unter dem Mikroskop bei hoher optischer Auflösung verfolgt werden kann.

Anfangs der neunziger Jahre war das Studium des Zebraäbrblings noch immer ein eher belächeltes Projekt einiger weniger Arbeitsgruppen. Das System begann jedoch zunehmend Forscher anzuziehen. Ein weiterer Meilenstein im Erfolgskurs des Zebraäbrblings

war die im Jahre 1996 publizierten Ergebnisse der Mutanten-Screens der Labore von Christiane Nüsslein-Volhard und Wolfgang Driever. Zusammen hatten diese beide Arbeitsgruppen über eintausend Gen-Mutationen isoliert [2, 3]. Damit war der Durchbruch geschafft und der Zebraäbrbling ein anerkanntes Tiermodell geworden. Wurde der Zebraäbrbling anfänglich im wesentlichen von Entwicklungs- und Neurobiologen gepriesen, hat man Zebraäbrlinge in der Zwischenzeit als Tiermodelle für menschliche Erkrankungen [4, 5], in der Pharmakologie zum „drug-screening“ [6] und in der molekularen Toxikologie [7, 8] adoptiert.

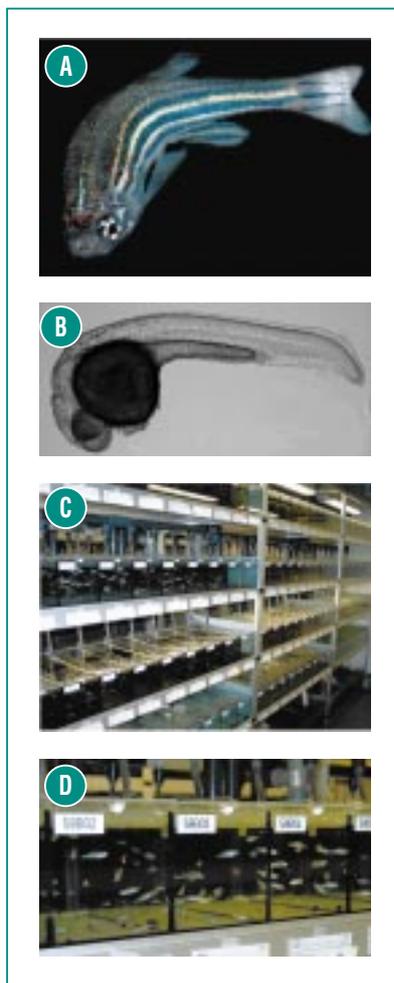


Abb. 1: A: Erwachsener Zebraäbrbling. B: Embryo 30 Stunden nach der Befruchtung der Eizelle. C, D: Anlage am Forschungszentrum Karlsruhe zur Massenhaltung von Zebraäbrlingen.

Die Stärke der „Forward Genetics“ zur Entschlüsselung von molekularen Mechanismen

Das Ziel der Entwicklungsbiologie ist es, die molekularen Mechanismen der Zellkommunikation und der Zellinteraktion zu entschlüsseln, die dazu führen, dass sich komplexe und hochfunktionellen Strukturen wie zum Beispiel ein Fisch oder der Mensch entwickeln können. Dazu braucht man Tiermodellensysteme, da man nur an diesen experimentelle Eingriffe ausführen kann, die notwendig sind, um die zu Grunde liegenden molekularen Mechanismen zu verstehen.

Ein Vorteil des Zebraäbrblings liegt darin, dass man ihn für klassische genetische Experimente (forward genetics) einsetzen kann [2, 3]. In diesen Analysen werden hunderte tausende von Fischen systematisch nach Gendefekten durch-

sucht, die man vorher durch Behandlung mit mutagenen Agenzien im Erbmateriale (der Desoxyribonukleinsäure oder DNS) erzeugt hat. Diese experimentelle Technik ist besonders gut geeignet, um komplexe Prozesse und Strukturen zu untersuchen.

Wie funktioniert dieser Ansatz? Stellen Sie sich vor, Sie wollten z. B. die Funktion eines Mikrowellenherdes verstehen und Sie hätten mehrere hunderte Geräte zur Verfügung. Sie verändern diese Geräte dann, indem Sie jeweils einen Teil entfernen und testen, wie dadurch die Funktion des Gerätes beeinträchtigt wird. Auf diese Weise finden Sie z. B. die Teile, die für die Beleuchtung des Innenraumes verantwortlich sind (mehrere Kabel, Lampe, Fassung, Türschalter, etc). Somit haben Sie zwei Ziele erreicht: Sie haben zum einen Bauteile identifiziert und außerdem gezeigt, dass sie eine Funktion in der Beleuchtung haben. Um dieses Anschauungsbeispiel noch realistischer zu machen, müssten Sie sich vorstellen, dass die Bauteile sehr klein (im Nanometerbereich) sind und der Mikrowellenherd aus mehr als 20.000 Einzelkomponenten besteht. Sie können diese Einzelkomponenten auch nicht anfassen oder sehen, sondern müssen sie erst in großer Stückzahl reproduzieren, um dann mit Hilfe ausgefeilter molekularbiologischer Techniken die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Bauteile zu untersuchen.

In den realen genetischen Screens im Zebrafisch gelang es die Funktion von tausenden von Genen bzw. Proteinen (Bauteile des Mikrowellenherdes) im

Zebrafisch zu identifizieren. Es wurden Gene gefunden, die für die Formgebung und Gewebeentwicklung im Embryo (Abb. 2) [2, 3, 9] oder für die Funktion des Nervensystems verantwortlich sind [2, 3, 10, 11]. Verlust des *cyclops* Gens zum Beispiel führt zur Ausbildung eines einzelnen zentralen Auges und Defekten in der Struktur des Gehirnes (Abb. 2A, B) Es ist aber auch klar geworden, dass die Funktion noch sehr vieler Gene unbekannt ist. Das Genom des Zebrafisch, das in der Zwischenzeit fast vollständig sequenziert wurde, umfasst ungefähr 25.000 Gene. Es liegt also noch ein weiter Weg vor uns, bevor wir die Funktion dieses Genoms umfassend verstehen können. Die Fischanlage des Forschungszentrums Karlsruhe soll dazu einen entscheidenden Beitrag liefern (Abb. 1C, D).

Zebrafische als Modelle menschlicher Erkrankungen

Viele Gene im Zebrafischgenom haben verwandte Gene im Menschen. Dadurch wird der Modellcharakter unserer Untersuchungserkenntnisse weiter unterstrichen. Diese Verwandtschaft begrenzt sich nicht nur auf die eigentliche Gen- und Proteinstruktur, sondern umfasst auch die regulatorischen Mechanismen, d. h. wie Gene gesteuert werden und wie Proteine miteinander interagieren. Viele regulatorische Gene, die Entwicklungsprozesse steuern, sind im Menschen als Krebsgene bekannt. Bestimmte Gendefekte rufen im Menschen und im Zebrafisch die gleichen Krankheitssymptome hervor, wie zum Beispiel die Mutation des Dystrophin-Gens, die im Menschen eine erb-

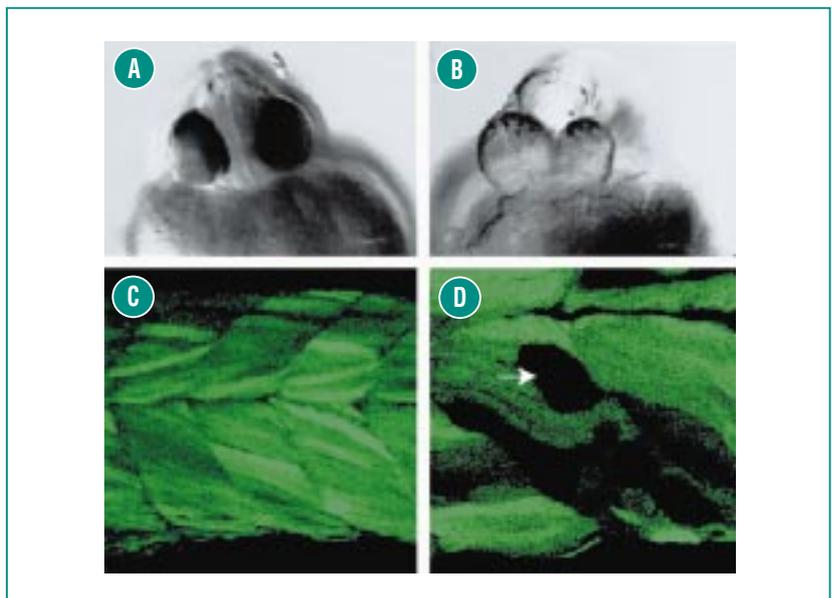


Abb. 2 : A, B: Wildtyp (A) bzw mutanter Embryo (B). Verlust des *cyclops* Gens führt zu einer Fusion der Augen (Cyclopie). C, D: Muskeln von einem Kontroll- (C) bzw „Knock-down“-Embryo (D), dem das Dystrophin-Protein fehlt. Die Muskelfibrillen (grün) lösen sich vom Bindegewebe, wodurch Löcher (Pfeil) im Muskelgewebe entstehen.

liche Muskelschwächeerkrankung verursacht [11, 12] (Abb. 2C,D). Man kann somit durch das Studium der Fisch-Mutanten etwas über menschliche Erkrankungen lernen und sogar die Fische benutzen, um nach neuen Medikamenten oder Therapien für den Menschen zu suchen.

Perspektive

Das Verständnis der molekularen Mechanismen der Krankheiten in Modellsystemen wie dem Zebrafisch ist Voraussetzung, um in Zukunft neue Therapien zu

entwickeln. Die gezielte Regeneration von menschlichen Geweben, die durch Verletzung oder Krankheit geschädigt wurden, ist ein nach dem heutigen Wissensstand noch visionäres Ziel. Um solche ehrgeizigen Projekte in die Realität umsetzen zu können, müssen wir noch viele Details der Entwicklung und der Erhaltung der normalen Körperfunktion verstehen lernen. Niedere Wirbeltiere wie der Zebrafisch haben eine weitaus höhere Regenerationsfähigkeit geschädigter Gewebe. So kann ein Fisch im Gegensatz zum Menschen Verletzungen am Herzen oh-

ne Vernarbung und damit verbundener Funktionsverluste reparieren [13]. Ein Schwerpunkt zukünftiger Forschung am Zebrafisch wird daher auch die Ergründung dieser Regenerationsfähigkeit sein, um zu lernen, wie man Gewebe im erwachsenen Organismus wiederherstellen kann.

Literatur

- [1] G. Streisinger, et al., *Production of clones of homozygous diploid zebra fish (Brachydanio rerio)*. *Nature*, 1981. 291(5813): p. 293-6.
- [2] W. Driever, et al., *A genetic screen for mutations affecting embryogenesis in zebrafish*. *Development*, 1996. 123: p. 37-46.
- [3] P. Haffter, et al., *The identification of genes with unique and essential functions in the development of the zebrafish, Danio rerio*. *Development*, 1996. 123: p. 1-36.
- [4] S. Berghmans, et al., *Making waves in cancer research: new models in the zebrafish*. *Biotechniques*, 2005. 39(2): p. 227-37.
- [5] E. Pradel, J.J. Ewbank, *Genetic models in pathogenesis*. *Annu Rev Genet*, 2004. 38: p. 347-63.
- [6] L.I. Zon, R.T. Peterson, *In vivo drug discovery in the zebrafish*. *Nat Rev Drug Discov*, 2005. 4(1): p. 35-44.
- [7] M. Behra, et al., *The use of zebrafish mutants to identify secondary target effects of acetylcholine esterase inhibitors*. *Toxicol Sci*, 2004. 77(2): p. 325-33.
- [8] A.J. Hill, et al., *Zebrafish as a model vertebrate for investigating chemical toxicity*. *Toxicol Sci*, 2005. 86(1): p. 6-19.
- [9] U. Strahle, et al., *one-eyed pinhead is required for development of the ventral midline of the zebrafish (Danio rerio) neural tube*. *Genes Funct*, 1997. 1(2): p. 131-48.
- [10] M. Behra, et al., *Acetylcholinesterase is required for neuronal and muscular development in the zebrafish embryo*. *Nat Neurosci*, 2002. 5(2): p. 111-8.
- [11] C. Etard, et al., *Mutation in the delta-subunit of the nAChR suppresses the muscle defects caused by lack of Dystrophin*. *Dev Dyn*, 2005. 234(4): p. 1016-25.
- [12] D. Bassett, P.D. Currie, *Identification of a zebrafish model of muscular dystrophy*. *Clin Exp Pharmacol Physiol*, 2004. 31(8): p. 537-40.
- [13] A. Raya, et al., *The zebrafish as a model of heart regeneration*. *Cloning Stem Cells*, 2004. 6(4): p. 345-51.

Das Wissen um die kleinsten und die größten Dinge:

50 Jahre Grundlagenforschung zur Struktur der Materie am Forschungszentrum Karlsruhe

R. Maschuw, Vorstand

Probleme lösen, Chancen nutzen, die Neugier befriedigen: dies sind die Motivationslinien für die Forschungsprogramme des Forschungszentrums Karlsruhe. Mit der Energieforschung wollen wir das bereits heute sichtbare Zukunftsproblem der globalen Energieversorgung lösen. Die Forschung zur Mikro- und Nanotechnologie als künftige Schlüsseltechnologie wird der heimischen Industrie neue Möglichkeiten für innovative Produkte und Verfahren eröffnen und die Erforschung der Struktur der Materie und hier insbesondere die Astroteilchenphysik folgt der Neugier, zu erkennen, was die Welt im Innersten zusammenhält oder vielleicht auch den Kosmos auseinandertreibt. Wiewohl letzteres als erkenntnisorientierte Grundlagenforschung auch an Universitäten und einigen Max-Planck-Instituten betrieben wird, weist das Forschungsprogramm Struktur der Materie des Zentrums doch ganz charakteristische, großforschungsspezifische Alleinstellungsmerkmale auf:

- Die in diesem Programm durchgeführten Projekte konzentrieren sich auf besonders schwierige, zum Teil langfristige und wichtige Fragestellungen von hoher internationaler Bedeutung.
- Die Vorhaben sind im Allgemeinen sehr groß, sowohl vom finanziellen Rahmen als auch vom apparativen Aufwand her, so dass sie nur in einem Forschungszentrum mit einer großen interdisziplinären wissenschaftlichen, technischen und administrativen Infrastruktur durchgeführt werden können.

- Als solche sind sie Fokus und Kondensationskeim für nationale und internationale Kollaborationen mit Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen und erfüllen damit in besonderer Weise die Mission eines Nationalen Forschungszentrums der Helmholtz-Gemeinschaft.
- Die starke nationale und internationale Verflechtung der Vorhaben des Programms Struktur der Materie bedeutet für die beteiligten Institute des Zentrums einen erheblichen Erfolgsdruck, verleiht andererseits dem Forschungszentrum Karlsruhe aber in besonderer Weise Sichtbarkeit und Anerkennung in der internationalen Wissenschafts-Community.

Astroteilchenphysik

Diese vier Kriterien gelten für alle Projekte des Forschungsbereichs Struktur der Materie, in besonderem Maße aber für das am stärksten grundlagenorientierte Programm Astroteilchenphysik mit seinen gegenwärtigen großen, internationalen Projekten KATRIN und AUGER.

Nachdem Neutrino-Oszillationsexperimente gezeigt haben, dass Neutrinos eine von Null verschiedene Masse besitzen müssen, wird das Karlsruhe-Tritium-Neutrino-Experiment KATRIN nun in der Lage sein, den absoluten Wert der Masse dieses leichtesten, einzig ungeladenen Elementarteilchens zu bestimmen, falls dieser im kosmologisch interessanten Bereich oberhalb von $0,2 \text{ eV}/m^2$ liegt. Zum einen wird damit die Rolle des Neutrinos für die Entwicklung des Uni-

versums festgelegt, zum anderen wird damit eine lang anstehende und wichtige Fragestellung der Elementarteilchenphysik gelöst. Eine Kollaboration von internationalen Experten auf diesem Gebiet hat sich unter Karlsruher Leitung zu diesem Experiment zusammengefunden. KATRIN zeigt in besonderer Weise auch die Bedeutung der umfassenden wissenschaftlichen und technischen Infrastruktur unseres Zentrums, denn ohne das für die Fusionsforschung aufgebaute Tritium-Laboratorium-Karlsruhe TLK, die Expertise in der Kryo- und Vakuumtechnik und der supraleitenden Magnettechnologie einerseits sowie die Erfahrung in der Neutrinophysik andererseits wäre dieses Experiment nicht durchführbar.

Dieser infrastrukturelle Aspekt gilt in ähnlicher Weise auch für den Aufbau und den Betrieb des PIERRE-AUGER-Observatoriums in der argentinischen Pampa: 1500 Bodendetektoren verteilt über 3000 km^2 und 24 Fluoreszenzteleskope nehmen die Signale der kosmischen Strahlung mit den höchsten im Universum überhaupt bekannten Energien auf. Von diesen Teilchen weiß man bisher nicht, woher sie kommen, welches ihre Natur ist und warum sie überhaupt existieren. In dieser großen internationalen AUGER-Kollaboration hat das Forschungszentrum Karlsruhe zusammen mit der Universität Karlsruhe und anderen Universitäten die Entwicklung, den Bau und den Betrieb der Fluoreszenzteleskope übernommen. Diese registrieren stereoskopisch in mondlosen Nächten der argentinischen Pampa das schwache Fluoreszenzlicht der kosmischen Schau-

er in der Atmosphäre und bestimmen damit Richtung, Zusammensetzung und Energie dieser mysteriösen kosmischen Teilchen. Aufgrund der langjährigen Erfahrung aus dem auf dem Gelände des Zentrums aufgebauten internationalen KASCADE-Experiment für kosmische Luftschauer im mittleren Energiebereich hat das Forschungszentrum auch in der wissenschaftlichen Analyse des AUGER-Experiments eine führende Rolle.

Grid-Computing

Gleichermaßen international von großer Bedeutung ist das Grid-Computing Zentrum Karlsruhe (GridKa) als eines der 11 weltweit verteilten, miteinander vernetzten großen Rechner- und Speichercluster im sogenannten Worldwide Large Hadron Collider Computing Grid WLCG. Mit Hilfe dieses Grid-Computing werden weltweit 5000 Wissenschaftler der Elementarteilchenphysik die ungeheure Datenflut von mehreren Peta-Byte pro Jahr aus den vier Experimenten des im kommenden Jahr in Betrieb gehenden Large Hadron Colliders LHC am Europäischen Kernforschungszentrum CERN aufnehmen und auswerten. Grid-Ka wird in enger Abstimmung mit CERN und den internationalen Partnern und in Zusammenarbeit mit der deutschen Elementarteilchen-Community aufgebaut und betrieben und ermöglicht dieser mit der Speicherkapazität und der Rechnerleistung des virtuellen globalen Megacomputers WLCG den transparenten Zugriff auf die LHC-Daten. Grid-Computing als neues Paradigma wissenschaftlichen Rechnens ist darüber hinaus das

wissenschaftliche Forschungsthema des Instituts für Wissenschaftliches Rechnen IWR in enger Zusammenarbeit mit der Universität Karlsruhe. Forschungszentrum Karlsruhe und Universität Karlsruhe werden darüber hinaus ihre Rechenzentren zu einem gemeinsamen wissenschaftlichen Computing- und Service-Zentrum ausbauen.

Synchrotronstrahlung

Ein weiteres wichtiges Element des Programms Struktur der Materie, gleichermaßen aber auch von großer Bedeutung für die Mikro- und Nanotechnologie im Forschungsbereich Schlüsseltechnologie ist die Synchrotronstrahlungsanlage ANKA. Ursprünglich nur geplant als intensive Röntgenquelle für die Röntgenlithographie zur Herstellung von hochpräzisen Mikrostrukturen, ist sie bereits heute mit ihren zwölf Strahlplätzen ein unabdingbares Instrument für eine Reihe von Forschungsprogrammen des Zentrums. Mit ihren sehr spezifischen Möglichkeiten dient sie aber auch als hoch willkommene Nutzereinrichtung für die externe Synchrotronstrahlungscommunity. Einmalig ist das Actiniden-Strahlrohr für die Analyse von radioaktiven Proben. Weitere besondere Einrichtungen sind die Messplätze für Infrarotspektroskopie und der Weichröntgenanalytik für die Festkörperphysik. Von großer Bedeutung für die gesamte Synchrotronstrahlungstechnologie ist die Entwicklung der supraleitenden Undulatoren im Forschungszentrum. Diese ermöglichen mit ihrer Strahlungscharakteristik den gegenwärtig weltweit im Bau befindliche



Abb. 1: Spiegel zum Messen der Leuchtspuren der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre sind Teil des Pierre-Auger-Observatoriums, das auf einer Fläche von 3500 km² in der argentinischen Pampa entsteht und die höchstenergetischen Teilchen im Universum messen soll.

Synchrotronstrahlungsanlagen mit niedrigen Energien auch den Zugang zum harten Röntgenbereich. Für ANKA selbst sind sie die Grundlage für zwei weitere dezidierte Messplätze für die In-situ-Synthese und -Charakterisierung von Nanomaterialien sowie zur tomographischen Analyse von Mikro- und Nanostrukturen. ANKA wird so zu einem zentralen Element der Karlsruhe-Nano-Mikro-Facility KNMF, die als Nutzereinrichtung auch externen Partnern zur Verfügung stehen wird.

Kondensierte Materie

Ebenso auf einer umfassenden Infrastruktur basiert das kleine aber hoch angesehene Forschungsprogramm Kondensierte Materie

mit Messplätzen zur Neutronenstreuung am Forschungsreaktor ORPHEE in Frankreich, mit dem modernen Weichröntgenmessplatz WERA an ANKA sowie den vielfältigen Präparations- und Analytikmöglichkeiten des Zentrums. Die Erforschung von Systemen mit korrelierten Elektronen in diesem Programm als Teil des Forschungsbereichs Struktur der Materie findet international große Anerkennung.

Struktur der Materie im Wandel der Zeit

Grundlagenforschung zur Aufklärung der Struktur der Materie hat am Forschungszentrum Karlsruhe eine lange Tradition und war



Abb. 2: Der großvolumige Flüssigszintillationsdetektor KARMEN (Karlsruhe Rutherford Mittelenergie Neutrinoexperiment) mit seinen mehr als 2300 Photomultipliern, die das bei Teilchenreaktionen entstehende Szintillationslicht nachweisen, wurde von Wissenschaftlern des Forschungszentrums Karlsruhe bis 2001 am Rutherford-Appleton-Laboratorium bei Oxford betrieben.

von Anbeginn ein herausragendes Element des Forschungsportfolios des Zentrums. Nicht zuletzt ange-regt durch den Bedarf aus der damals dominierenden Kerntechno-logieforschung des Zentrums nach präzisen Kernstrukturdaten und Neutronenwirkungsquerschnitten für die verschiedensten Materialien wurden bereits zu Beginn der 60er Jahre unter Nutzung des For-schungsreaktors FR2 intensive Un-tersuchungen zur neutronenindu-zierten (n,gamma)-Kernspektro-skopie durchgeführt. Ein 3-MV-Van-de-Graaff-Generator und spä-ter das Karlsruher Zyklotron mit seinem einmaligen Neutronen-Flugzeitspektrometer waren wei-tere zentrale Instrumente für solche Untersuchungen. Sehr schnell er-gaben sich daraus aber auch grundlegende Fragen nach der Struktur der Atomkerne, dem Re-aktionsmechanismus von Kernre-aktionen, der zugrunde liegenden Wechselwirkungen und den Kern-modellen. Diese seinerzeit hoch-aktuellen Probleme der Kernphy-sik ebenso wie das damals noch junge Feld der den Betazerfall be-stimmenden schwachen Wech-selwirkung wurden seit 1961 auch in dem gemeinsam mit der Uni-versität Karlsruhe betriebenen In-stitut für Experimentelle Kernphy-sik intensiv studiert. Insbesonde-re das Karlsruher Zyklotron dien-te bis in die 80er Jahre auch den umliegenden Universitäten als Nut-zer-Einrichtung der Kernphysika-lischen Grundlagenforschung.

Zur gleichen Zeit fand auch die stürmische Entwicklung der Hoch-energie-Elementarteilchenphysik statt, sodass sich Arbeitsgruppen des Zentrums auch an Forschungs-projekten bei DESY, dem CERN

und in Zerpukhov beteiligten. So-gar die Entwicklung supraleitender Beschleunigerstrukturen für die Hochenergieforschung wurden über viele Jahre durchaus erfolg-reich durchgeführt. „Mittelener-gieforschung“ heute aufgegangen in der Forschung von Hadronen und Kernen wurde von Arbeits-gruppen des Forschungszentrums am damaligen Schweizerischen Institut für Nuklearforschung, SIN, dem heutigen Paul-Scherrer-Institut, bis in die 80er Jahre hinein intensiv und sehr erfolgreich betrie-ben. In dieser Zeit fiel dann der Beschluss des Forschungszen-trums, sich aus Experimenten und Projektbeteiligungen an anderen Forschungszentren zurückzuzie-hen und sich auf zentrumsspezi-fische Großprojekte mit eigenstän-diger Sichtbarkeit zu konzentrieren. Das „Karlsruhe-Medium-Energy-Neutrinoexperiment“ KARMEN am Rutherford-Appleton-Laboratori-um, RAL, war das erste Projekt dieser Art, das sich entsprechend der internationalen und heute im Zentrum üblichen Gepflogenhei-ten bereits im Vorfeld einer inter-nationalen Begutachtung unter-zog. Unter Nutzung der intensiven parasitären Neutrinostrahlen aus der Spallationsneutronenquelle ISIS des RAL suchte KARMEN mit seinen 60.000-l-Flüssig-Szintilla-tor-Detektor u. a. nach sogenann-ten Neutrinooszillationen, die spä-ter in einem anderen Energiebe-reich mit atmosphärischen Neutri-nos als Nachweis der Existenz massiver Neutrinos tatsächlich ge-funden wurden. Auch in dem in-ternationalen Neutrinoexperiment GALLEX im italienischen Gran-Sasso-Untergrundlaboratorium, das mit hoher Präzision das Defi-zit der Sonnenneutrinos als Folge

dieser Neutrino-Oszillationen gemessen hat, war das Forschungszentrum mit der Verantwortung für die 30-t-Flüssig-Gallium-Prozesstechnik in entscheidender Weise beteiligt. Zur Untersuchung der kosmischen Strahlung und seiner Spektralverteilung wurde auf dem Gelände des Zentrums das sich über die Größe von vier Fußballfeldern erstreckende Luftschauerarray KASCADE mit einem tonnenschweren Zentraldetektor für die hadronische Komponente des Luftschauers aufgebaut. Heute überdeckt KASCADE-Grande mit seinen Detektorstationen das gesamte Zentrum. Unter Nutzung des Van-de-Graaff-Generators wurde bis zu seinem Abschalten in diesem Jahr in den vergangenen zwanzig Jahren ein umfassendes, international hoch anerkanntes Programm der Nuklearen Astrophysik betrieben. Aus all diesen Projekten heraus hat sich das heutige Programm der Astroteilchenphysik mit seinen großen internationalen Projekten entwickelt, wie es in den folgenden Artikeln ausführlich beschrieben wird.

Ähnlich wie die Grundlagenforschung von der Kern- und Teilchenphysik zur Astroteilchenphysik hat auch die Festkörperphysik von den ersten Neutronenstreuexperimenten zur Materialuntersuchung am FR2 über die sogenannte Nukleare Festkörperphysik bis zu dem heute wohlstrukturierten und modernen Programm der korrelierten Elektronensysteme einen erheblichen Wandel erfahren. Dieses Programm der Kondensierten Materie des Zentrums ist heute wesentlicher Bestandteil des größeren Helmholtz-Programms gleichen Namens in dem For-

schungsbereich Struktur der Materie.

Vergleichsweise jüngeren Datums ist dagegen die Entwicklungsgeschichte der Synchrotronstrahlungsanlage ANKA (ANGströmquelle KARlsruhe) und des Grid-Computing Zentrums GridKa. ANKA wurde nach langer Planungsphase Ende der 90er Jahre gebaut und hat 2003 mit einer Basisinstrumentierung den regelmäßigen Nutzerbetrieb aufgenommen. Als Großgerät der wissenschaftlichen Infrastruktur wird ANKA im Helmholtz-Forschungsbereich Struktur der Materie betrieben. Mit dem gegenwärtigen Ausbau der Strahlrohre und den programmspezifischen Messstationen wird ANKA aber auch zu einer unabdingbaren, äußerst leistungsfähigen Infrastruktureinrichtung für die Nukleare Sicherheitsforschung, die Forschung zur Kondensierten Materie und in besonderer Weise für die Mikro- und Nanotechnologie. Gridka entstand 2001 aus dem dringenden Bedarf und auf ausdrückliche Anforderung der deutsche Teilchenphysik Community und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung für die Datenverarbeitung der zukünftigen Teilchenphysikexperimente. Mit dem täglichen Zugriff von hunderten von Benutzern weltweit ist Gridka heute ein wichtiger und geachteter Partner nicht nur des weltumspannenden Computing Grids WLCG, sondern auch der internationalen Teilchenphysik- und Computing Community.

Die Experimente zur Astroteilchenphysik, aber auch die anderen hier geschilderten großforschungsspezifischen Projekte und Aktivitäten dienen letztlich alle der Auf-

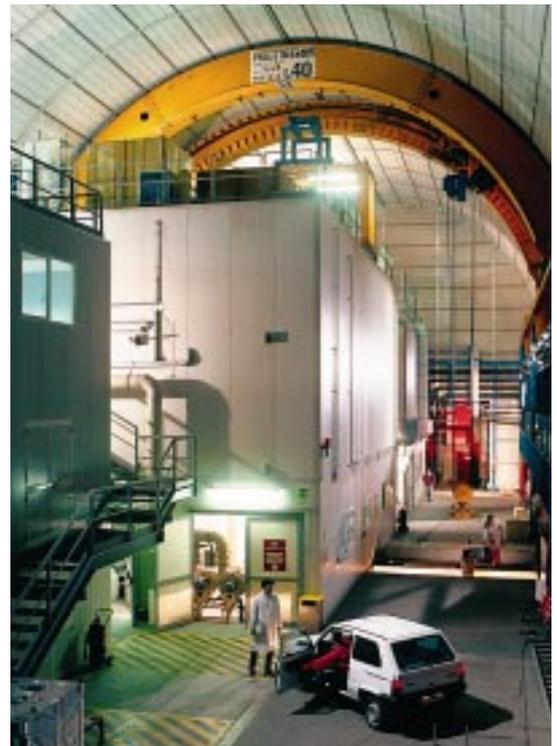


Abb. 3: Für das internationale Neutrinoexperiment GALLEX zu Messung der Sonnenneutrinos entwickelte das Forschungszentrum Karlsruhe die Prozesstechnik zur Handhabung von 30 Tonnen flüssigem Gallium.

klärung der Struktur der Materie und ihrer Dynamik von den kleinsten Dimensionen der Elementarteilchen bis zu den kosmischen Dimensionen des Universums. Das Programm „Struktur der Materie“ als kleinstes Programm des Forschungszentrums Karlsruhe benötigt etwa ein Sechstel der finanziellen Ressourcen des Zentrums ist aber außerordentlich effizient, mit großem wissenschaftlichen „Output“ und internationaler Sichtbarkeit und verleiht dem Zentrum eine hohe wissenschaftliche Reputation.

Kosmische Strahlung – ein neues Fenster zum Universum

J. Blümer, IK und Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe

Galaktische und Extragalaktische kosmische Strahlung

Hochenergetische Teilchen aus dem Kosmos treffen die Erde ständig aus allen Richtungen, wobei die Intensität mit steigender Energie rasch abnimmt. Es handelt sich überwiegend um Protonen und Atomkerne, die wahrscheinlich mit Hilfe von Schockwellen und Magnetfeldern in Supernova-Explosionen beschleunigt wurden. Die Teilchen durchqueren im Laufe von ca. 10 Millionen Jahren die Milchstraße mit ihrem Magnetfeld von einigen Mikrogauss mehrfach auf chaotischen Bahnen; sie verhalten sich auf dieser Längenskala wie ein diffundierendes Plasma, sodass die Ankunftsrichtungen auf der Erde isotrop sind und die Identifizierung der Quellen nicht möglich ist. Man vermutet bei Energien von 10^{18} eV das Ende der Supernova-Beschleuniger und einen Übergang zu extragalaktischen Teilchen, die mit steigender Energie immer weniger abgelenkt werden.

In mehreren Experimenten wurden kosmische Teilchen mit Energien von mehr als 10^{20} eV beobachtet. Die Intensität beträgt bei diesen Energien nur noch ein Teilchen pro Quadratkilometer und Jahrhundert. Ihre Natur, Herkunft, Beschleunigung und Ausbreitung sind ungelöste Rätsel der Astroteilchenphysik. Selbst konventionelle Interpretationen erfordern, dass man die physikalischen Gesetze bei Extremwerten von Energie, Magnetfeldstärke, Gravitation und bei Geschwindigkeiten ganz nahe der Lichtgeschwindigkeit anwenden muss. Man diskutiert hier

die Schockwellenbeschleunigung in der Umgebung von supermassiven Schwarzen Löchern mit 100 Millionen Sonnenmassen ebenso wie alternative Szenarien mit „neuer Physik“, z. B. topologische Defekte der Raum-Zeit, Zerfälle von Reliktteilchen aus der Urknallphase oder die Vernichtung supersymmetrischer Teilchen [1, 2].

Direkte Messungen mit hoch fliegenden Ballonen und Satelliten sind auf Energien kleiner als 10^{14} eV beschränkt, wo der Fluss noch einige Teilchen pro Quadratmeter und Minute beträgt. Bei höheren Energien muss man die Kaskaden von Sekundärteilchen ausnutzen, die von den Primärteilchen in großer Höhe erzeugt werden. Diese so genannten ausgedehnten Luftschauer wurden 1938 von Pierre Auger entdeckt und korrekt interpretiert. Sie können Hunderte von Milliarden Teilchen enthalten und sich über viele Quadratkilometer erstrecken.

Galaktische kosmische Strahlung: KASCADE-Grande

Das KASCADE-Grande-Instrument auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe umfasst einen 200×200 m² großen zentralen Teil mit 250 relativ dicht positionierten Detektoren, der von 38 weiteren Messstationen umgeben ist, die auf 0,5 km² verteilt sind. Damit lassen sich kosmische Teilchenschauer im Energiebereich von 10^{14} eV bis hin zu fast 10^{18} eV nachweisen. Dieses Intervall ist interessant, weil die Intensitätskurve hier eine bemerkenswerte Änderung aufweist, das so genannte „Knie“ im Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Die Daten von KASCADE-Grande zeigen, dass zunächst die leichten Teilchen (Protonen, Heliumkerne) verloren gehen und erst bei höheren Energien die schwereren Kerne bis hin zum Eisen folgen: sowohl die Beschleunigung als auch der Verbleib im Magnet-



Abb. 1: Teilchendetektoren des KASCADE-Grande-Experiments und Radioantennen des LOPES-Projekts sind integriert, um galaktische kosmische Strahlung zu studieren und neue Technologien zu entwickeln.

feld sind für die höher geladenen Partikel effizienter. Die möglichst genaue Messung der Energiespektren für ausgewählte Gruppen von leichten, mittelschweren und schweren Kernen ist die zentrale Aufgabe des KASCADE-Grande-Experiments [3]. Die Interpretation der Daten erfordert sehr detaillierte und aufwändige Modellrechnungen für die Luftschauer in Energiebereichen, die für irdische Beschleuniger nicht zugänglich sind. Die in Karlsruhe entwickelten Programmpakete CORSIKA und CONEX sind weltweit die Standardwerkzeuge dazu.

In den letzten Jahren wurden Radioantennen in das KASCADE-Grande-Detektorfeld zum Nachweis der Radiostrahlung von Luftschauern im Frequenzbereich bis zu 100 MHz integriert. Mit dem

Projekt LOPES gelang ein technologischer Durchbruch: Luftschauer sind für wenige Nanosekunden die hellsten Radioblitze am Himmel, und ihre Messung ist eine viel versprechende Alternative zu den Teilchendetektoren [4]. Die Forschungen dazu werden in Karlsruhe weitergeführt und auf das Auger-Observatorium zu noch weit höheren Teilchenenergien übertragen.

Das Pierre-Auger-Observatorium

Das Pierre Auger-Observatorium soll mit einem neuen Konzept, kosteneffektiver Technologie und voller Himmelsabdeckung Klarheit über den Ursprung der höchstenergetischen kosmischen Strahlung schaffen.

In der argentinischen Pampa der Provinz Mendoza entsteht seit 1999 eine Detektoranlage mit 3000 km² Fläche: 1600 Detektoren im Abstand von 1,5 km weisen die Luftschauer nach, die bei Energien des Primärteilchens oberhalb von 10¹⁸ eV mindestens drei Detektoren gleichzeitig treffen. Hierbei kommen Wassertanks mit 12 Kubikmeter Reinstwasser zum Einsatz, die mit Photosensoren das Cherenkovlicht der Schauerteilchen registrieren. In klaren, dunklen Nächten werden die Schauer gleichzeitig auch optisch beobachtet: Insgesamt 24 Teleskope an vier Standorten am Rand des Detektorfeldes weisen die Leuchtspur des Stickstoff-Fluoreszenzlichts nach, das die Teilchen in der Luft anregen. Die Anlage wird im Jahr 2007 fertig gestellt sein und

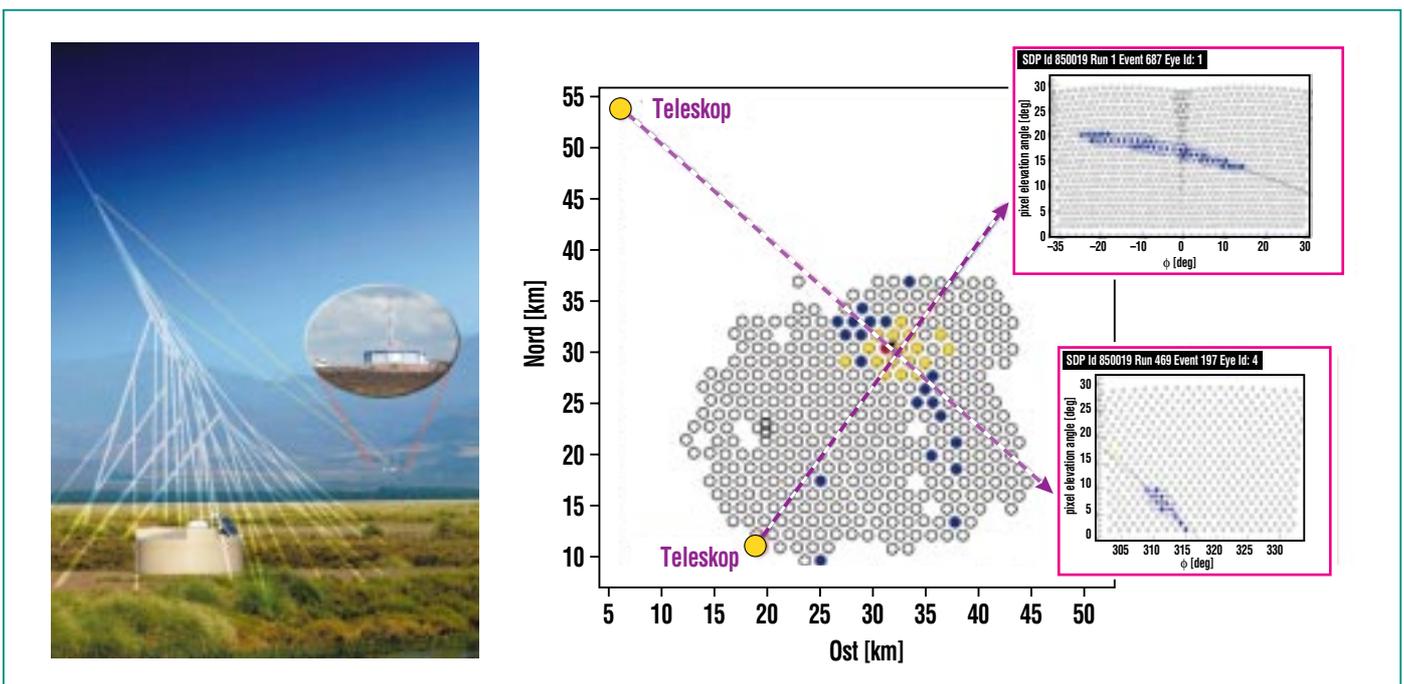


Abb. 2: Links: Luftschauermessung mit dem Auger-Observatorium: Wassertanks als Cherenkovdetektoren registrieren Schauerteilchen am Erdboden, während elektronische Digitalteleskope die Leuchtspur des in der Luft emittierten Fluoreszenzlichts abbilden. Rechts: stereoskopische Beobachtung eines großen Luftschauerereignisses.

liefert bereits seit Januar 2004 Daten von ausgezeichneter Qualität [5]. Die Kalibration, Überwachung und Interpretation ist eine gewaltige Aufgabe für die internationale Auger-Kollaboration, die cirka 350 Wissenschaftler und Ingenieure aus 17 Ländern umfasst. Der deutsche Anteil ist mit etwa 20 Prozent sehr sichtbar und das Forschungszentrum Karlsruhe leistet mit den Universitäten Aachen, Karlsruhe, Siegen und Wuppertal mehrere Schlüsselbeiträge zur Technologie und Analyse.

Teilchen-Astronomie

Es deutet sich an, dass bei den höchsten Energien ein neues Fenster zum Universum geöffnet werden könnte, die Teilchenastronomie. Protonen mit ultrahohen Energien werden in den intergalaktischen Magnetfeldern nur wenig abgelenkt und können Informationen liefern, die komplementär zu anderen Informationsträgern wie Licht und hochenergetische Gammastrahlung sind. Dies ergänzt sich hervorragend mit der Neu-

trinoastronomie, die derzeit mit dem Detektor IceCube von unserem Helmholtzpartner „DESY“ am Südpol aufgebaut wird. Diese neuartige Multi-Messenger-Astronomie soll in Zukunft weiter ausgebaut werden, unter anderem mit dem Nord-Observatorium, das die Auger-Kollaboration ab 2008/9 in Colorado, USA, mit einer Fläche von 10 000 km² aufbauen möchte, um den gesamten Himmel im Lichte kosmischer Strahlung beobachten zu können.

Literatur

- [1] Komitee für Astroteilchenphysik (KAT), <http://www.astroteilchenphysik.de>
- [2] M. Boratav, G. Sigl (Ed.), *Comptes Rendus Physique* 5/4 (2004) 417
- [3] T. Antoni et al., *Astropart. Phys.* 24 (2005) 1
- [4] H. Falcke et al. (LOPES Collaboration), *Nature* 435 (2005) 313
- [5] J. Abraham et al. (Pierre Auger Collaboration), *Nucl. Instrum. Meth. A* 523 (2004) 50

Neutrinos auf der Waage von KATRIN

G. Drexlin, IK und Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe

Einleitung

Neutrinos spielen bei der Untersuchung der Struktur der Materie und der Erforschung des Aufbaus des Universums eine spezielle Rolle: Ihre Masse ist viel kleiner als die aller anderen Elementarteilchen, ihre Wechselwirkung mit normaler Materie ist extrem klein, und während der ersten Sekunde nach dem Urknall wurden so viele von ihnen produziert, dass sie neben den Photonen die häufigsten Teilchen im Universum sind. Experimente mit Neutrinos sind extrem schwierig, öffnen aber ein einzigartiges Fenster zur Beantwortung von fundamentalen Fragen wie nach dem Ursprung der Masse von Elementarteilchen oder der Ursache der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum und damit unserer eigenen Existenz.

Im letzten Jahrzehnt konnten bei der Erforschung von Neutrinos wichtige experimentelle Durchbrüche erzielt werden: Durch die Beobachtung von Neutrino-Oszillationen konnte zweifelsfrei geklärt werden, dass Neutrinos massebehaftete Teilchen sind. Dieser erste Hinweis auf neue Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik ist auch ein erster Schritt zur Klärung des Ursprungs der kosmologischen Dunklen Ma-

terie, die die Dynamik des Universums dominiert. Da bisher nur die Differenzen von Neutrinomassen bestimmt werden können, ist die wichtigste ungeklärte Eigenschaft von Neutrinos die absolute Größe ihrer Ruhemasse. Die Bestimmung dieses Schlüsselparameters ist die zentrale Motivation des Karlsruhe Tritium Neutrino (KATRIN) Experimentes, das derzeit im Rahmen einer internationalen Kollaboration von mehr als 100 Wissenschaftlern und Ingenieuren unter Federführung des Forschungszentrums am Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) aufgebaut wird.

Paulis „Geisterteilchen“ lebt wieder auf

KATRIN nutzt den Effekt, aufgrund dessen der Physiker Wolfgang Pauli das Neutrino 1930 voraussagte: Beim Betazerfall wird ein Neutron in ein Proton sowie ein Elektron und Neutrino umgewandelt, wobei sich das Elektron und das Neutrino die beim β -Zerfall frei werdende Energie teilen. Der ideale β -Emitter ist molekulares Tritium mit seiner sehr kleinen Übergangsenergie von 18,6 keV und seiner kurzen Lebensdauer von 12,3 Jahren und entsprechend hohen Zerfallsaktivität. Da das

Neutrino aus dem β -Zerfall nicht nachgewiesen werden kann, bestimmt KATRIN die Neutrinomasse durch eine extrem präzise Messung der Form der Energieverteilung der β -Zerfallselektronen in der Nähe des kinematischen Endpunkts. Dort manifestiert sich die Masse des Neutrinos entsprechend Einsteins berühmter Masse-Energie-Beziehung $E = mc^2$ als winzige Änderung der Form des Spektrums. Da es sich hierbei um einen extrem kleinen Effekt in der Größenordnung von 10^{-11} der Gesamtrate handelt, erfordern die KATRIN-Messungen eine hochintensive Tritiumquelle. Der europaweit einzige Ort, an dem eine derart intensive Quelle betrieben werden kann, ist das TLK, das über langjährige Erfahrung in der Tritiumprozessertechnik verfügt. Daher kann das Experiment nur am Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt werden. Weitere zentrale Beiträge für KATRIN werden geleistet durch das IK (Astroteilchenphysik, UHV-Technik), das ITP (Supraleitende Magnete und Kryotechnik) sowie das IPE (Elektronik und Datenaufnahme).

KATRIN

Abb. 1 zeigt einen Überblick über das insgesamt 75 m lange Expe-

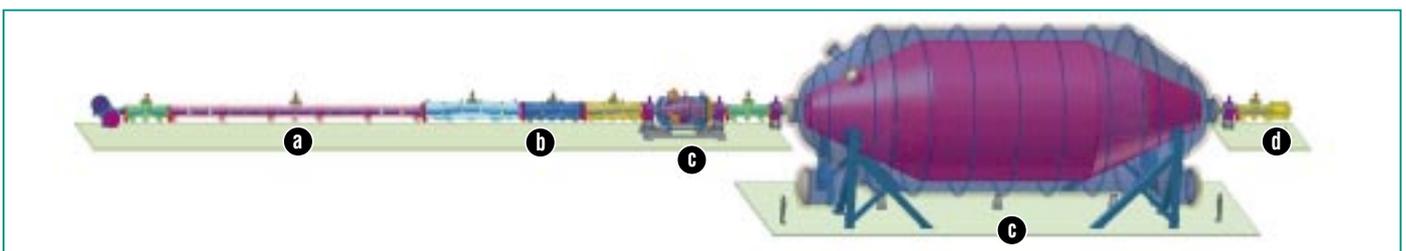


Abb. 1: Das gesamte KATRIN-Experiment erstreckt sich über eine Länge von 75 Metern und besteht aus der hochintensiven Tritiumquelle (a), der Tritiumpumpstrecke (b), den beiden elektrostatischen Spektrometern – Vor- und Hauptspektrometer (c) – sowie dem Elektronendetektor (d).

riment. Die Hauptkomponenten gliedern sich in: a) die fensterlose hochintensive molekulare Tritiumquelle mit 10^{11} β -Zerfällen pro Sekunde, b) die Tritiumpumpstrecke aus aktiven und passiven Elementen, in der die T_2 -Moleküle aus der Strahlführung eliminiert werden, c) das System aus zwei elektrostatischen Spektrometern zur Energieanalyse der Elektronen sowie d) den Halbleiterdetektor zum Zählen der transmittierten Elektronen. Auf ihrer gesamten Flugstrecke werden die β -Zerfallselektronen dabei durch ein System aus supraleitenden Solenoiden mit Feldstärken im Bereich von 3–6 T adiabatisch geführt.

Tritiumquelle

Die fensterlose, gasförmige Tritiumquelle von KATRIN besteht aus einem 10 m langen Edelstahlrohr, in das mittig molekulares Tritium mit einer Rate von 2 Ci/s eingespeist wird. Wesentliche technologische Herausforderungen ergeben sich aus der erforderlichen Temperaturstabilität der Quelle von kleiner als ± 30 mK bei der Betriebstemperatur $T = 27$ K, sowie aus der hohen Isotopenreinheit von $\sim 95\%$ T_2 . Der 16 m lange Quellsystem ist derzeit in der Fertigung bei einem industriellen Partner und wird Anfang 2008 am TLK in Betrieb genommen. Die aus der Quelle diffundierenden T_2 -Moleküle werden in einer differenziellen Pumpstrecke durch Turbomolekularpumpen (TMP) abgepumpt und in den geschlossenen KATRIN-Kreislauf zurückgeführt. Dieses Konzept wurde im Rahmen des Testexperimentes TILO erfolgreich erprobt. Eine anschließende kryogene Kaltfallenstrecke

($T = 5$ K) mit einer inneren Schicht aus Argonfrost garantiert, dass alle im Strahlrohr verbliebenen T_2 -Moleküle über Kryosorptionsprozesse gebunden werden und der nachfolgende Spektrometerbereich tritiumfrei bleibt. Auch hier konnte mit einem Testexperiment (TRAP) das Pumpkonzept erfolgreich verifiziert werden.

Spektrometer

Die Energieanalyse der β -Zerfallselektronen erfolgt bei KATRIN in zwei Schritten: Zunächst werden in einem kleineren Vorspektrometer alle niederenergetischen Elektronen mit $E < 18,4$ keV ausgesiebt, da sie keine Information über die Neutrinomasse tragen. Das 3,5 m lange Vorspektrometer (s. Abb. 2) ist seit 2004 in Betrieb und hat die neuartigen vakuumtechnischen und elektromagnetischen Designansätze von KATRIN erfolgreich verifiziert. Durch eine Kombination von TMPs mit

Getterpumpen wurde routinemäßig ein Ultrahochvakuum (UHV) $< 10^{-11}$ mbar erreicht, womit das UHV Konzept von KATRIN in kleinerem Maßstab demonstriert werden konnte. Im nachfolgenden hochauflösenden Hauptspektrometer ($\varnothing = 10$ m, Länge = 24 m) wird die Energie der Elektronen nahe am Endpunkt präzise bestimmt. Die Aufrechterhaltung eines UHV von $< 10^{-11}$ mbar in einem Volumen von 1250 m³ sowie die geforderte Stabilität der Gegenspannung von besser als 1 ppm bei 18,6 keV sind besondere technologische Herausforderungen. Der riesige Spektrometertank wurde bei einem industriellen Partner gefertigt und wird noch 2006 in einer neuen Experimentierhalle am TLK in Betrieb genommen. Die durch das Spektrometersystem transmittierten Elektronen werden schließlich in einem segmentierten, untergrundarmen Silizium-Zähler nachgewiesen.



Abb. 2: Das Vorspektrometer sortiert die Elektronen geringer Energie aus, die keine relevanten Informationen tragen.

Ausblick

Der Aufbau von KATRIN wird im Jahre 2009 abgeschlossen sein. Nach Inbetriebnahme der Gesamtanlage wird das Experiment mehrere Jahre das Spektrum von Tritium am Endpunkt untersuchen. Mit einer Neutrinomassen-Sensitivität von 0,2 eV hat KATRIN gute

Aussichten die absolute Massenskala von Neutrinos zu bestimmen und damit den Anteil der heißen dunklen Materie im Universum zu fixieren. KATRIN als ein Schlüsselexperiment der Astroteilchenphysik verdeutlicht dabei exemplarisch die Helmholtz-Mission: die Durchführung von technologisch herausfordernden und

international sichtbaren Großexperimenten zur Lösung von fundamentalen Fragestellungen.

Kondensierte Materie: Elektronen mit starken Korrelationen

H. v. Löhneysen, IFP und Universität Karlsruhe; K.-P. Bohnen, IFP

Forschung im Bereich kondensierter Materie beschäftigt sich mit den vielfältigen Phänomenen, die durch das Wechselspiel einer großen Zahl von Atomen in Festkörpern oder Flüssigkeiten entstehen. Die Wechselwirkungen und das Zusammenspiel von Elektronen, Atomen und Molekülen in einem Vielteilchensystem entscheiden über die Eigenschaften der Materie: ob sie fest, flüssig oder gasförmig ist, weich oder hart, optisch durchsichtig oder reflektierend, isolierend oder metallisch, magnetisch oder supraleitend. Das HGF-Programm Kondensierte Materie, das von Forschungszentrum Jülich und Forschungszentrum Karlsruhe getragen wird, trägt dieser Vielfalt durch klare Schwerpunktsetzung Rechnung: elektronische und magnetische Phänomene; von Materie zum Material; weiche Materie und Biophysik. Dabei sind die Arbeiten des Forschungszentrums Karlsruhe, die im Institut für Festkörperphysik (IFP) durchgeführt werden, hauptsächlich im Bereich elektronischer und

magnetischer Phänomene angesiedelt.

Die Vielzahl elektronischer und magnetischer Phänomene in kondensierter Materie ist eine direkte Konsequenz elektronischer Wechselwirkungen. Quantenprozesse auf kürzesten Längen- und Zeitskalen haben direkte Auswirkungen auf makroskopisch beobachtbare Phänomene. Stark wechselwirkende Elektronen führen zu neuen Phänomenen wie Spin-, Ladungs- und Orbitalordnung, Metall-Isolator-Übergängen, extrem großen effektiven Massen oder zu neuartiger Supraleitung in der Nähe zu magnetischer Ordnung. Schwer-Fermion-Systeme und Hochtemperatursupraleiter geben neue Rätsel auf – trotz weltweit intensiver Forschung. Die Karlsruher Arbeiten zielen auf ein Verständnis elektronischer und magnetischer Phänomene in Materialien mit starken elektronischen Wechselwirkungen, auch um deren Anwendungspotenzial auszuloten.

Zur Untersuchung solcher neuartiger Materialien werden hochauflösende Spektroskopien mit Neutronen und mit Photonen (Synchrotronstrahlung) eingesetzt. So steht mit dem Weichröntgenanalytik-Strahlrohr WERA an der Karlsruher Synchrotronstrahlungsquelle ANKA ein Instrument zur Verfügung, an dem elektronische Eigenschaften und etwa ihr Orbitalcharakter mittels Photoemissionsspektroskopie und -mikroskopie sowie Röntgenabsorption bestimmt werden können. Abb. 1 zeigt einen Überblick über die Experimentierstationen von WERA. Neutronenstreuexperimente liefern Informationen über magnetische Ordnungszustände und magnetische Anregungen, über Schwingungszustände der Atome sowie über Kopplungseffekte zwischen elektronischen, magnetischen und strukturellen Freiheitsgraden. Hierzu betreibt das IFP am Neutronenreaktor „Orphée“ am Centre d'Etudes Saclay (Frankreich) des Commissariat à l'énergie atomique (CEA) ein thermisches Dreiachsenspektrometer. Diese Untersuchungen werden ergänzt durch hochempfindliche Messungen der thermodynamischen Eigenschaften und des elektronischen Transports zur Ermittlung energetisch sehr niedrig liegender Anregungen und kollektiver Effekte bei Phasenübergängen. Schichten und Schichtsysteme aus geeigneten Materialien mit korrelierten Elektronen werden auf eine Änderung der elektronischen Eigenschaften durch Variation der Schichtabfolge und chemischen Zusammensetzung und in Blick auf mögliche Anwendungen untersucht. Die Arbeiten werden durch theoretische Analysen begleitet,

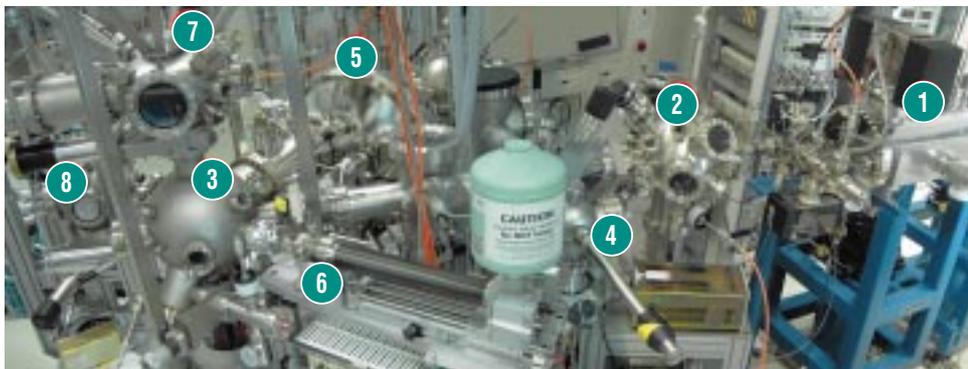


Abb. 1: Die kombinierten Experimentierstationen am IFP-Strahlrohr WERA bei ANKA ermöglichen empfindliche spektroskopische und mikroskopische Untersuchungen. Der Weichröntgenstrahl trifft von rechts ein und läuft nach links. (1) Refokussierspiegel; (2) Photoemissions-Elektronenmikroskop (PEEM); (3) Kammer für Photoemission und Röntgenabsorption (PES/NEXAFS); (4) Schleuse; (5) Elektronen-Energieanalysator; (6) Fluoreszenzdetektor; (7) Oberflächen-Präparationskammer; (8) Kammer zur Herstellung epitaktischer Schichten mit Laserablation.

wobei der Schwerpunkt auf Dichtefunktional-Berechnungen liegt.

Aus der Vielzahl der am IFP in letzter Zeit untersuchten Systeme seien hier einige wenige Ergebnisse exemplarisch herausgegriffen.

Die oxidischen Hochtemperatursupraleiter sind Paradebeispiele stark korrelierter Elektronensysteme. Detaillierte Messungen der Dispersion der Cu-O-Streckschwingungen in optimal dotiertem $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,95}$ mittels inelastischer Neutronenstreuung zeigen eine sehr starke Temperaturabhängigkeit der Schwingungsfrequenz der Gitterschwingungen (Phononen) in einem engen Wellenvektorbereich [1]. Eine mögliche Erklärung ist das Entstehen einer räumlich variierenden Elektronenkonzentration, d. h. eine sogenannte Ladungsdichtewelle, die durch Elektron-Elektron-Wechselwirkung hervorgerufen wird. Diese Tendenz zur Ladungsdichtewellen-Instabilität wurde durch Untersuchungen an anderen Kupferoxiden (Kupraten) bestätigt, in denen bei tiefen Temperaturen statische Ladungsdichtewellen beobachtet wurden: Es treten hier Phononanomalien auf (Abb. 2), wie sie für eine Kopplung von Ladungsdichtewellen und Gitterschwingungen erwartet werden [2]. Weitere wichtige Konsequenzen für die theoretischen Modelle zur Beschreibung der Hochtemperatursupraleitung hat die Entdeckung einer Lücke im magnetischen Anregungsspektrum wie sie bei $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ bei 33 meV mittels Neutronenstreuung gefunden wurde [3].

Unter den Systemen mit ungewöhnlichen elektronischen Eigenschaften nimmt der kürzlich entdeckte Supraleiter MgB_2 mit einer

– für Nichtoxide – sehr hohen Übergangstemperatur von 39 K eine besondere Stellung ein [4]. Er hat eine relativ einfache Kristallstruktur und ist daher modernen numerischen Verfahren zur Bestimmung von elektronischer Struktur, Gitterdynamik und Elektron-Phonon-Wechselwirkung sehr gut zugänglich. In enger Zusammenarbeit von Experiment und Theorie konnte gezeigt werden, dass die Supraleitung in zwei elektronischen Bändern unterschiedlicher Symmetrie entsteht, wobei die Elektron-Phonon-Wechselwirkung für die Supraleitung verantwortlich ist. Neutronen- und Röntgenstreuuntersuchungen stimmen sehr gut mit berechneten

Phononenspektren überein [5-8]. Tunnelexperimente an dünnen Filmen haben den schlüssigen Nachweis gebracht, dass der Kopplungsmechanismus tatsächlich vom Elektron-Phonon-Typ ist. Der genaue Vergleich mit parameterfreien Berechnungen der Gitterdynamik und der für die Supraleitung verantwortlichen Kopplungsfunktionen zeigt überraschenderweise, dass der Interband-Paarung eine entscheidende Bedeutung zukommt (Abb. 3) [9]. Anschaulich gesprochen „springen“ die beiden Elektronen eines Cooper-Paars unter dem Einfluss von Gitterschwingungen von einem Band zum anderen und werden so stärker mit-

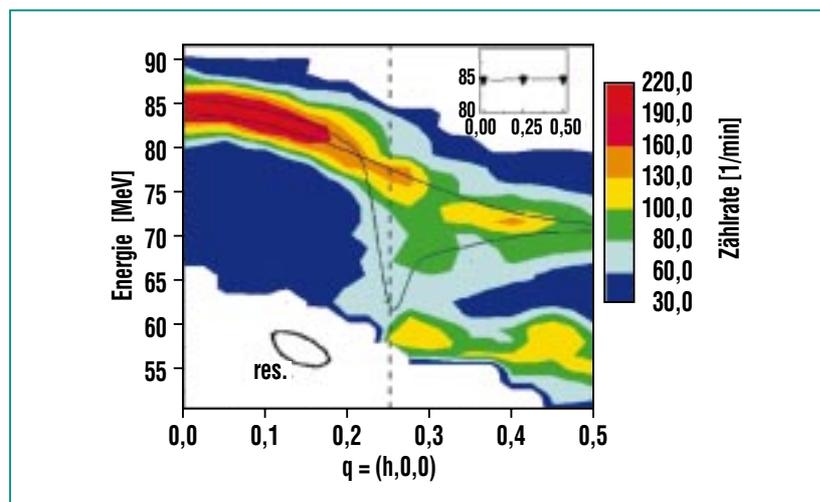


Abb. 2: Farbdarstellung der Intensitäten inelastisch gestreuter Neutronen, beobachtet an der Verbindung $\text{La}_{1,875}\text{Ba}_{0,125}\text{CuO}_4$ bei einer Temperatur von $T = 10 \text{ K}$. Die Intensitäten oberhalb und unterhalb der Energie von 62 meV entsprechen der Anregung der Kupfer-Sauerstoff-Streckschwingungen bzw. Biegeschwingungen. Die durchgezogenen Linien zeigen die aus diesen Daten abgeleitete Dispersion der Streckschwingungen. Die gestrichelte Linie zeigt den Wellenvektor der statischen Ladungsordnung. Hier sieht man eine starke Energieverbreiterung der Neutronenstreuintensität. Für die weißen Bereiche liegen keine Daten vor. Die in der linken unteren Ecke abgebildete Ellipse veranschaulicht die instrumentelle Auflösung. Das in der rechten oberen Ecke eingefügte Diagramm zeigt die Dispersion der Streckschwingungen in einer anderen kristallographischen Richtung.

einander gekoppelt. Diese Wechselwirkung ist sehr selektiv, da sie hauptsächlich an niedrig liegende optische Phononen koppelt, bei denen die Bor-Atome senkrecht zu den Bor-Ebenen schwingen [9].

Neben der Untersuchung stark korrelierter Elektronensysteme ist insbesondere das Studium von Phasenübergängen ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten am IFP. Hier sind vor allem die Systeme ausgezeichnet, bei denen der Phasenübergang durch Variation externer Parameter wie z. B. Magnetfeld, chemische Zusammensetzung oder Druck kontinuierlich zu tiefen Temperaturen (im Extremfall bis zum absoluten Nullpunkt $T = 0$) verschoben werden kann. Bei hinreichend niedrigen Übergangstemperaturen beeinflussen niedrig liegende Anregungen des Systems den Phasenübergang und Quantenphänomene können dann zu völlig neuartigen Erscheinungen führen. Unter anderem sind $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$ [10] und MnSi [11] Systeme, die solch quantenkritisches Verhalten zeigen. MnSi ist ein schwacher Ferromagnet ($T_c = 35$ K), bildet am Phasenübergang aufgrund des Fehlens eines Inversionszentrums in der Kristallstruktur jedoch eine langwellige Spiralstruktur aus, d.h. auf einer Länge von etwa 180 \AA dreht sich das magnetische Moment der Mn-Atome um 360° . Die Temperatur des Phasenübergangs lässt sich durch Druck bis herab zu $T_c = 0$ verschieben (Abb. 4). Dies ist ein Beispiel für Quantenphasenübergänge, also Übergänge, die streng genommen am absoluten Temperaturnullpunkt stattfinden. Sie bestimmen aber das Verhalten und dominieren viele Eigenschaften

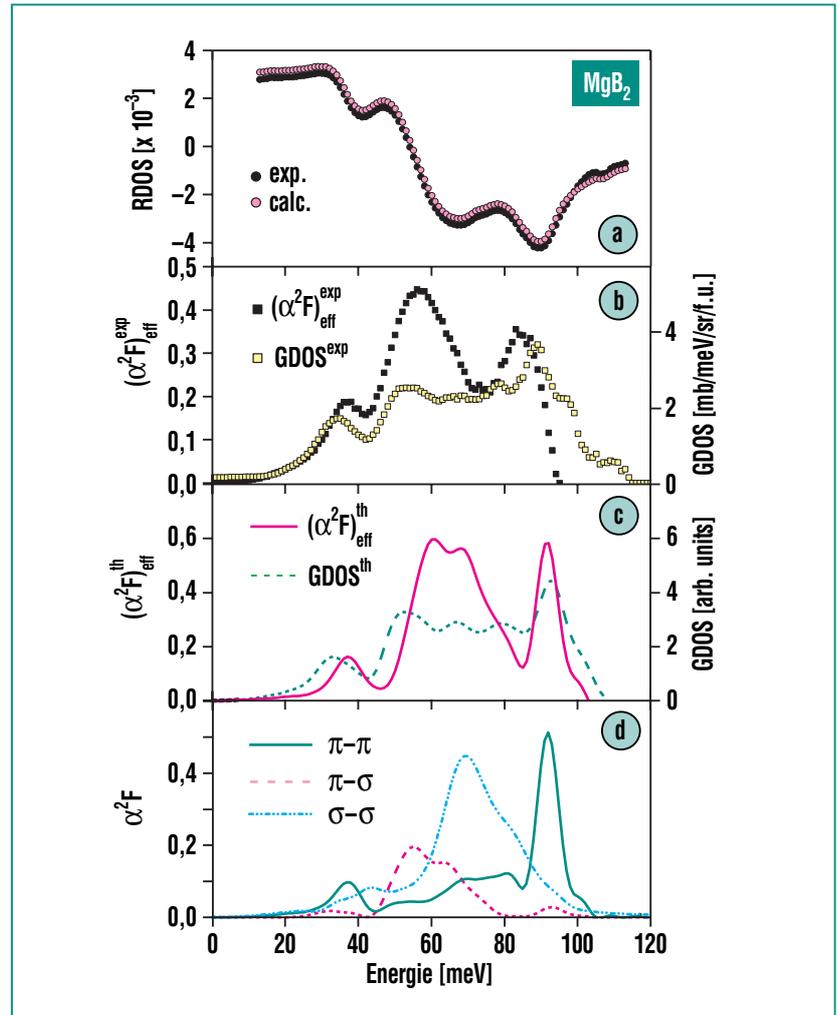


Abb. 3: Analyse der Tunneldaten von MgB_2 -Schichten.

a) Reduzierte Zustandsdichte (RDOS) aus Strom-Spannungs-Messungen an einer MgB_2 -Tunneliode (schwarze Punkte) und der Fit als Resultat der sog. McMillan-Rowell-Inversion der Eliashberg-Gleichungen.

b) Effektive Eliashberg-Funktion $(\alpha^2 F)_{\text{eff}}^{\text{exp}}$ – dabei ist F die Phononenzustandsdichte und α ein Maß für die über die Fermi-Fläche gemittelte Elektron-Phonon-Kopplung – resultierend aus der Inversion und die verallgemeinerte Phononenzustandsdichte von MgB_2 . Man beachte die starke Abweichung von der experimentell bestimmten Phononenzustandsdichte GDOS^{exp} [12].

c) Effektive Eliashberg-Funktion als Resultat $(\alpha^2 F)_{\text{eff}}^{\text{th}}$ einer McMillan-Rowell-Inversion einer berechneten Tunnelzustandsdichte der π -Fermifläche und theoretische verallgemeinerte Phononenzustandsdichte GDOS^{th} .

d) Berechnung der einzelnen Eliashberg-Funktionen für virtuelle Übergänge π - π , π - σ und σ - σ . In die Rechnung wurde die Verbreiterung durch die Phononenlebensdauer mit einbezogen.

stark korrelierter Systeme auch bei endlichen Temperaturen. Dabei werden große Abweichungen vom Standardmodell der Metalle, dem Landau-Modell der Fermi-Flüssigkeiten, beobachtet, deren Ursache in vielen Fällen noch völlig ungeklärt ist. Neutronenstreuungsmessungen, bei denen die MnSi-Probe verschiedenen hydrostatischen Drücken ausgesetzt wurde, haben ein überraschendes Bild ergeben: In der Nähe dieses Quantenphasenübergangs bleibt zwar die Periodizität dieser Spiralstruktur erhalten, sie verliert aber ihre Orientierung (Abb. 4). Dies führt zu einer völlig neuartigen magnetischen Phase [13], deren Topologie an bestimmte Flüssigkristallphasen erinnert.

Im Licht dieser zahlreichen unerwarteten Phänomene lässt sich ohne Übertreibung sagen, dass der Bereich der kondensierten Materie am Anfang einer neuen Epoche steht mit vielen neuen Herausforderungen, die sowohl zu grundlegend neuen Konzepten in der Physik kondensierter Materie führen wie auch dem Ziel dienen, Materialien mit speziellen Eigenschaften gezielt herzustellen.

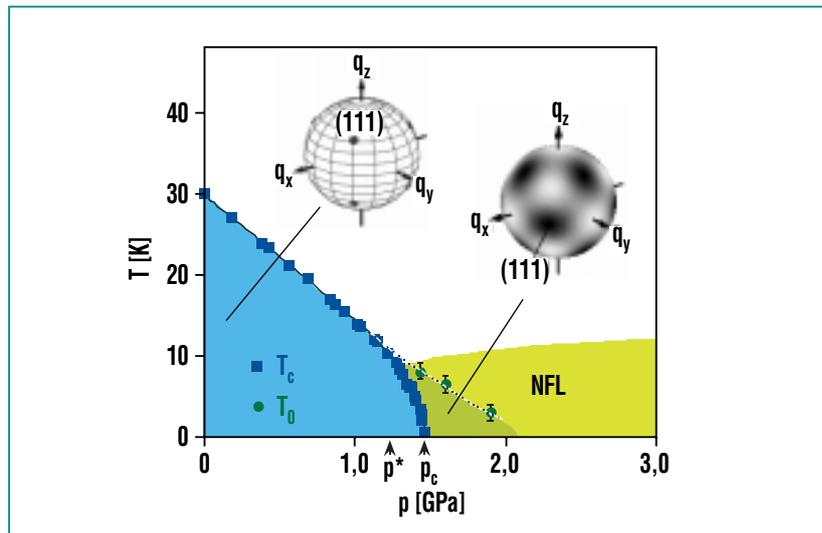


Abb. 4: Druckabhängigkeit der ferromagnetischen Übergangstemperatur T_c von MnSi (Quadrates). Das mit makroskopischer Suszeptibilität gemessene T_c verschwindet beim kritischen Druck p_c . Zwischen p^* und p_c ist der ferromagnetisch-paramagnetische Übergang 1. Ordnung, bei kleineren Drücken 2. Ordnung. Die langwellige magnetische Spiralordnung ($l = 180 \text{ \AA}$) führt zu Reflexen („Überstrukturefle“ in der elastischen Neutronenstreuung, die auf einer Kugel mit Durchmesser $4p / l$ um einen reziproken Gittervektor liegen. Für $p = 0$ liegen die Reflexe scharf in den (111)-Richtungen (linke Kugel). Nahe p_c sind diese Reflexe über die ganze Kugel verschmiert, was einer Orientierungsunordnung entspricht, bei der der Radius der Kugel aber erhalten bleibt (rechte Kugel). Die Kreise bezeichnen die Temperatur T_0 , unterhalb der diese partielle Ordnung beobachtet wird. In dem mit NFL bezeichneten Bereich beobachtet man im elektrischen Widerstand ausgeprägte Abweichungen vom Fermi-Flüssigkeitsmodell.

Literatur

- [1] L. Pintschovius, D. Reznik, W. Reichardt, Y. Endoh, H. Hiraka, J.M. Tranquada, H. Uchiyama, T. Masui, S. Tajima, *Phys. Rev. B* 69, 214506 (2004)
- [2] D. Reznik, L. Pintschovius, M. Ito, S. Iikubo, M. Sato, H. Goka, M. Fuzjita, K. Yamada, G.D. Gu, J.M. Tranquada, *Nature*, in print
- [3] D. Reznik, P. Bourges, L. Pintschovius, Y. Endoh, Y. Sidis, T. Masui, S. Tajima, *Phys. Rev. Lett.* 93, 207003 (2004)
- [4] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, J. Akimitsu, *Nature* 410, 63 (2001)
- [5] K.-P. Bohnen, R. Heid, B. Renker, *Phys. Rev. Lett.* 86, 5771 (2001)
- [6] Y. Kong, O.V. Dolgov, O. Jepsen, O.K. Andersen, *Phys. Rev. B* 64, 020501 (2001)
- [7] H.-J. Choi, D. Roundy, H. Sun, M.L. Cohen, S.G. Louie, *Nature* 418, 758 (2002)
- [8] A.Q.R. Baron, H. Uchiyama, Y. Tanaka, T. Ishikawa, R. Heid, K.-P. Bohnen, S. Tajima, T. Ishikawa, *Phys. Rev. Lett.* 92, 197004 (2004)
- [9] J. Geerk, R. Schneider, G. Linker, A.G. Zaitsev, R. Heid, K.-P. Bohnen, H. v. Löhneysen, *Phys. Rev. Lett.* 94, 227005 (2005)
- [10] H. v. Löhneysen, *J. Phys.: Cond. Matt.* 8, 9689 (1996)
- [11] C. Pfleiderer, S.R. Julian, G.G. Lonzarich, *Nature* 414, 427 (2001)
- [12] Osborn et al., *Phys. Rev. Lett.* 87, 017005 (2001)
- [13] C. Pfleiderer, D. Reznik, L. Pintschovius, H. v. Löhneysen, M. Gast, R. Rosch, *Nature* 427, 227 (2004)

GridKa – Grid Computing Centre Karlsruhe

K.-P. Mickel, IWR



Abb. 1: Die zwölf sehr großen Rechenzentren im LHC Computing Grid-Projekt befinden sich in Nordamerika, Europa und Ostasien. GridKa deckt den mitteleuropäischen Raum ab.

Einleitung

„Karlsruhe ist Schaltstelle für das schnellste Rechnernetz der Welt“ [1], „Das schnellste Datennetz der Welt hat einen Knotenpunkt im Grid Computing Centre Karlsruhe“ [2], „Forschungszentrum Karlsruhe ist Standort eines sehr großen Rechenzentrums des World Wide Grid“ [3] – mit solchen Schlagzeilen berichtete die Tagespresse über das Projekt GridKa, das seit 2002 im Forschungszentrum Karlsruhe heranwächst. Was verbirgt sich hinter diesen Meldungen?

Ende der 90er-Jahre begannen bei CERN [4], dem europäischen Kernforschungszentrum bei Genf, die Planungen für den Bau des Large Hadron Collider (LHC [5]), des weltweit größten Elementarteilchenbeschleunigers. In einem unterirdischen kreisförmigen Tunnel von 27 km Länge werden hier ab 2007 sowohl Protonen als auch Schwerionen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit zur Kollision gebracht. Aus den dabei entstehenden Unmengen von Sekundärteilchen erhoffen sich die Physiker grundlegende Erkenntnisse über den Urknall sowie den Aufbau und die Eigenschaften der Materie.

GridKa als Teil des globalen LHC Computing Grid

Schon in einem sehr frühen Planungsstadium zeigte es sich, dass die bei den LHC-Experimenten entstehenden Datenmengen größer sein würden als alles, was die Welt bisher gesehen hat. Man erwartet pro Jahr etwa 10 Millionen Gigabyte an Daten; das entspricht etwa der Informationsmenge, die die gesamte Menschheit im glei-

chen Zeitraum durch Sprechen erzeugt. Solche gigantischen Datenmengen lassen sich nicht mehr von einem einzigen zentralen Rechenzentrum speichern und verarbeiten, zumal die Nutzer dieser Daten, etwa 8.000 Kernphysiker, über den ganzen Globus verteilt sind. So entstand die Idee eines „Grid“, eines mehrstufigen Netzes unterschiedlich großer Rechenzentren in aller Welt, das den Namen LHC Computing Grid (LCG [6]) erhielt. Im LCG werden die Daten unmittelbar nach ihrem Entstehen an den Experimenten am CERN über extrem leistungsfähige Internet-Verbindungen an zwölf sehr große Rechenzentren in Nordamerika, Europa und Ostasien verteilt (Abb. 1). Mit jedem dieser sehr großen Rechenzentren sind jeweils etwa zehn mittelgroße Rechenzentren verknüpft, die ihrerseits einen Teil der Daten übernehmen und sie letztlich den Wissenschaftlern zur Verfügung stellen. GridKa [7], das Grid Computing



Abb. 2 : Festplattensysteme mit mehr als 4.000 Platten und einer Speicherkapazität von insgesamt knapp 800 Terabyte: Das entspricht rund 10.000 Arbeitsplatz-PCs und ist zur Zeit die größte Ansammlung von Plattenspeichersystemen in der deutschen Wissenschaftslandschaft.

Centre Karlsruhe im Forschungszentrum Karlsruhe, versorgt als eines der zwölf Großrechenzentren 23 wissenschaftliche Gruppen mit etwa 400 beteiligten Physikern in Deutschland sowie weitere Gruppen in Österreich, Polen, Tschechien und der Schweiz mit Daten und Rechenleistung. Das Gesamtprojekt LCG ist hinsichtlich der benötigten Rechenkapazität, der Grid-Strukturen, der Datenmengen, der Datenbankanforderungen und der global erforderlichen Netzinfrastruktur derzeit ohne jedes Vorbild auf der Welt.

Datennetze und Middleware – Basis des Grid-Computing

Grid-Computing, also das Arbeiten in einem aus vielen geografisch verteilten Rechenzentren bestehenden Grid, bedeutet, dass ein Wissenschaftler zunächst an seinem Arbeitsplatz seine Aufträge in das Grid-System eingibt. Dabei muss er angeben, mit welchen im Grid vorhandenen Daten welche Berechnungen durchzuführen sind. Eine intelligente Steuerungssoftware, für die sich der Begriff „Middleware“ eingebürgert hat, muss dann im weltweiten Grid die gewünschten Ressourcen suchen und so koordinieren, dass die Anforderungen des Wissenschaftlers optimal erfüllt werden können. Dazu muss zunächst festgestellt werden, wo im Grid in näherer Zukunft genügend Computerkapazität frei sein wird, wo auf der Welt sich die gewünschten Daten befinden und welche Internetkapazitäten für die Übermittlung großer Datenbestände zur Verfügung stehen. Sobald das alles geregelt ist, kann der Auftrag des Nutzers im Grid aus-

geführt und danach die entstandenen Ergebnisse an ihn zurückgesandt werden. Zusätzlich muss die Middleware u. A. sicherstellen, dass nur berechtigte Benutzer im Grid arbeiten können [8] und dass die verbrauchten Ressourcen für Abrechnungszwecke verursachergerecht nachgewiesen werden können.

Planung, Aufbau und Betrieb von GridKa

Im Jahre 2001 fassten die an den LHC-Planungen beteiligten deutschen Physiker zusammen mit Gruppen, die an bereits existierenden Teilchenbeschleunigern arbeiteten, ihre Vorstellungen für ein großes deutsches Grid-Rechenzentrum zusammen; diese Arbeit bildete die Grundlage der GridKa-Planungen bis zum Jahre 2009 [9]. Auf der Basis dieser Anforderungen konzipierten auf Anregung des Institutes für Experimentelle Kern-

physik der Universität (TH) Karlsruhe Wissenschaftler des Institutes für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) am Forschungszentrum Karlsruhe den Aufbau und späteren Betrieb von GridKa, ebenfalls bis 2009 [10]. Mit maßgeblicher Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung begann 2002 in bescheidenem Rahmen die Installation von Rechnern, Plattenspeichern, Magnetbandspeichern und Internetverbindungen. In jedem Folgejahr wurden die Kapazitäten jeweils verdoppelt, so dass GridKa schon heute, ein Jahr vor Beginn der Experimente am LHC, mit 2.150 Prozessoren, je 800.000 Gigabyte Platten- und Magnetbandspeicher sowie mit Internetverbindungen mit einer Gesamtbandbreite von 20 Gigabit/Sekunde zum leistungsfähigsten Grid-Rechenzentrum Europas geworden ist [11, 12] (Abb. 2,3,4). Im Jahr 2008, wenn der LHC-Beschleuniger sei-



Abb. 3: Mit mehreren tausend Prozessoren und einer Datenkapazität von mehr als einer Million Gigabyte ist GridKa das leistungsstärkste Grid-Rechenzentrum Mitteleuropas.

nen vollen Betrieb aufnehmen wird, werden die GridKa-Ressourcen um einen weiteren Faktor vier gewachsen sein. Bis dahin werden die rund um den Globus stetig wachsenden Grid-Kapazitäten für umfangreiche vorbereitende Arbeiten genutzt. Das vernetzte Zusammenwirken von mehr als hundert Rechenzentren, von tausenden von Nutzern, von zehntausenden von Prozessoren und von hunderttausenden von Datenbanken wird geplant und getestet, damit die komplexe Grid-Technik beim Beginn der LHC-Experimente zuverlässig zur Verfügung steht.

Zusammenfassung

Mit GridKa, dem Grid Computing Centre Karlsruhe, entsteht derzeit im Institut für Wissenschaftliches Rechnen des Forschungszentrums Karlsruhe das leistungsfähigste Grid-Rechenzentrum Mitteleuropas. GridKa ist ein wesentlicher Teil des weltumspannenden LHC Computing Grid, in dem zwölf sehr große und mehr als 100 mittelgroße Rechenzentren in aller Welt über das Internet miteinander verbunden sind. Diese globale Computer-Infrastruktur wird von etwa 8.000



Abb. 4: Schnelle Netzwerke sind eine wichtige Voraussetzung für Grid-Computing: Mit solchen Gigabit-Ethernet-Routern sind die Computer von GridKa untereinander und mit anderen Grid-Rechenzentren in aller Welt mit Bandbreiten bis zu 20 Gigabit/s verbunden.

Kernphysikern in aller Welt genutzt, die sich durch die Auswertung der Messdaten von Elementarteilchenbeschleunigern neue Erkenntnisse über offene Fragen unseres Universums erhoffen. Die Nutzung von GridKa steht zunächst nur Wissenschaftlern auf dem Gebiet der Hochenergie- und Elementarteilchenphysik offen; mittelfristig soll GridKa jedoch auch für einige wei-

tere Wissenschaftszweige geöffnet werden. Mitte 2006 hat GridKa etwa 25 Prozent seiner geplanten Endkapazität erreicht; 2008 wird der vorläufige Endausbau erreicht sein.

Literatur

- [1] *Badische Neueste Nachrichten*, 24.04.02
- [2] *Handelsblatt*, 05.10.05
- [3] *Rheinpfalz*, 18.02.06
- [4] <http://www.cern.ch>
- [5] <http://www.cern.ch/lhc>
- [6] <http://www.cern.ch/lcg>
- [7] <http://www.gridka.de>
- [8] U. Epting, *Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe*, Jahrgang 36, 3/2004, 153
- [9] P. Malzacher, A. Sandoval, L. Köpke, A. Putzer, D. Lanske, G. Quast, V. Lindenstruth, M. Schmelling, M. Kunze, K. Schubert, Th. Müller, L. Schmitt, P. Mättig, P. Braun-Munzinger, R. Heuer, R. Manke, <http://grid.fzk.de/LHCComputing-1july01.pdf>
- [10] H. Marten, K.-P. Mickel, R. Kupsch, <http://grid.fzk.de/RDCCG-answer-v8.pdf>
- [11] J. v. Wezel, H. Marten, *Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe*, Jahrgang 36, 3/2004, 138
- [12] M. Alef, B. Hoefl, H. Marten, J. v. Wezel, *Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe*, Jahrgang 36, 3/2004, 143

Raffinierte Produkte, die das Leben angenehmer machen.



Selbst wenn Sie uns nicht kennen sollten, unseren Erzeugnissen sind Sie sicher schon begegnet.

Denn durchschnittlich jeder 5. Liter Kraftstoff, der an Deutschlands Zapfsäulen getankt wird, wurde bei MIRO hergestellt. Mit unseren hochwertigen Mineralölprodukten sorgen wir für Mobilität und Wärme, beispielsweise in Form von schwefelfreien Kraftstoffen oder Heizöl. Darüber hinaus liefern wir die Grundstoffe für eine Vielzahl von Produkten, die das Leben angenehmer machen – von Kunststoffen bis zu Medikamenten.

In einer der modernsten und leistungsfähigsten Raffinerien Europas arbeiten wir rund um die Uhr dafür, die kontinuierliche Versorgung mit Mineralölprodukten sicherzustellen. Und daran, Ihr Leben ein gutes Stück einfacher und bequemer zu machen.

Weitere Informationen zu MIRO erhalten Sie unter folgender Adresse oder auf unserer Website www.miro-ka.de.

Mineralölraffinerie
Oberrhein GmbH & Co. KG

Nördliche Raffineriestraße 1
76187 Karlsruhe
Telefon: (0721) 956-3465
Internet: www.miro-ka.de



